

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж**

«На правах рукопису»

УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Лариса ГЛОБА

« ____ » _____ 2020 р.

**Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою «Інформаційно-комунікаційні
технології»
зі спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»
на тему: «Метод попереднього планування 5G топології та ресурсів
стільникової мережі»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ПІ-391мп

Харченко Владислав Богданович

Керівник:

Доцент кафедри ІТМ ІТС, доцент, к.т.н.

Астраханцев Андрій Анатолійович

Рецензент:

Доцент кафедри ТК ІТС, доцент, к.т.н.,

Явіся Валерій Сергійович

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Інститут телекомунікаційних систем
Кафедра Інформаційно-телекомунікаційних мереж

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Інформаційно-комунікаційні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Лариса ГЛОБА

« ____ » _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Харченку Владиславу Богдановичу

1. Тема дисертації «Метод попереднього планування 5G топології та ресурсів стільникової мережі», науковий керівник дисертації доцент кафедри інформаційно-телекомунікаційних мереж ІТС Астраханцев Андрій Анатолійович, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «04» листопада 2020 р. № 3218-с
2. Термін подання студентом дисертації 10.12.2020 р.
3. Об'єкт дослідження: Аспекти планування радіомереж 5G
4. Предмет дослідження Методи підвищення показників якості системи радіодоступу.
5. Перелік завдань, які потрібно розробити:
 1. Особливості радіомереж мобільного зв'язку технології 5G
 2. Аналіз основних параметрів радіоінтерфейсу
 3. Планування безпроводової мережі зв'язку 5G
6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:
 1. Зміст магістерської роботи;
 2. Мета роботи;
 3. Дослідження 5G та тестування карти світу;
 4. Огляд етапів розвитку мобільного зв'язку;

5. Варіанти використання 5G, вимоги та спектр;
6. Основні властивості технології;
7. Сценарій розгортання та вибір обладнання;
8. Дослідження характеристик мережі;
9. Висновки.

7. Орієнтовний перелік публікацій

8. Дата видачі завдання 01.09.2019 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Підбір науково-технічної літератури	20.09.2019 р.- 20.12.2019 р.	виконано
2	Аналіз технічних особливостей радіомереж мобільного зв'язку технології LTE	21.12.2019р.- 21.02.2020 р.	виконано
3	Дослідження основних параметрів радіоінтерфейсу для планування мережі LTE	22.02.2020 р.- 22.04.2020 р.	виконано
4	Планування безпроводової мережі зв'язку 5G	23.04.2020 р. 23.06.2020 р.	виконано
5	Моделювання тестової системи	24.06.2020 р. 24.08.2020 р.	виконано
6	Розробка стартап проекту	25.08.2020 р. 25.09.2020 р.	виконано
7	Висновки, вступ, реферат	26.09.2020 р. 29.10.2020 р.	виконано
8	Розробка презентації	30.11.2020 р. 06.12.2020 р.	виконано

Студент

Владислав ХАРЧЕНКО

Науковий керівник дисертації

Андрій АСТРАХАНЦЕВ

РЕФЕРАТ

Текстова частина магістерської дисертації 107 с., 65 рис., 10 табл., 27 джерел.

Об'єкт дослідження: Аспекти планування радіомереж 5G.

Предмет дослідження: Методи підвищення показників якості системи радіодоступу.

Мета роботи-аналіз особливостей планування радіомереж 5G.

У роботі проведено дослідження методів планування та оптимізації систем абонентського радіодоступу на базі технології 5G. Досліджено актуальне питання підвищення якості надання послуг у мережах 5G.

Зроблено аналіз принципів побудови і функціонування мереж 5G, досліджено основні параметри радіоінтерфейсу мережі. Проведено моделювання мережі 5G для району міста Києва, проведено розрахунок ємності системи та проведено підбір необхідного обладнання.

Результати роботи дозволяють оцінити сучасні підходи до планування та оптимізації мережі 5G, перспективи модернізації мереж зв'язку для підвищення якості обслуговування абонентів.

Галузь використання –сучасні інфотелекомунікаційні мережі України.

Ключові слова: MIMO, OFDM, 5G, LTE, стільникова мережа, кодування, модуляція.

ABSTRACT

Text part of the master's dissertation 107 pp., 65 figs., 10 tables, 27 sources.

Object of research: Aspects of planning 5G radio networks.

Subject of research: Methods of improving the quality of the radio access system.

The purpose of the work is to analyze the peculiarities of 5G radio network planning.

The research of methods of planning and optimization of subscriber radio access systems on the basis of 5G technology is carried out in the work. The topical issue of improving the quality of services in 5G networks is studied. The analysis of principles of construction and functioning of 5G networks is made, the basic parameters of a radio interface of a network are investigated. Modeling of the 5G network for the district of Kyiv was carried out, the system capacity was calculated and the necessary equipment was selected.

The results of the work allow us to evaluate modern approaches to the planning and optimization of the 5G network, the prospects of modernization of communication networks to improve the quality of customer service.

Field of use - modern info-telecommunication networks of Ukraine.

Keywords: MIMO, OFDM, 5G, LTE, cellular network, encoding, modulation.

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ РАДІОМЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ	9
1.1 Аналіз розвитку безпроводових телекомунікаційних мереж	9
1.2. Аналіз технічних особливостей мережі LTE	12
1.2.1 Архітектура мережі LTE	12
1.2.2 Фізичний рівень LTE	14
1.2.3 Методи множинного доступу	15
1.3. Аналіз технічних особливостей мережі 5G	23
1.4 Аналіз особливостей модернізації мереж зв'язку від LTE до 5G	24
1.4.1 Варіант від EPS до SA	24
1.4.2 Варіант від EPS до NSA	25
1.4.3 Варіант від EPS до NSA та SA	26
РОЗДІЛ 2	
АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РАДІОІНТЕРФЕЙСУ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ 5G	28
2.1 Основні складові мереж 5G	28
2.1.1 Агрегація несучих та подвійне підключення	28
2.1.2 NetworkSlicing і віртуалізація мережних функцій (VNF)	29
2.1.3 Multi-domainSliceManagement	30
2.1.4 Архітектура радіо та EDGE	35
2.1.5 Архітектура ядра і транспортної мережі	37
2.2 Фактори, які впливають на планування мереж 5G	50
РОЗДІЛ 3	
ПЛАНУВАННЯ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ ТА ОЦІНКА ЇЇ ХАРАКТЕРИСТИК	68
3.1 Дослідження характеристик мережі, що проектується	68
3.2 Вибір правильної форми хвилі для mmWave	73
3.3 Аналіз характеристик заданого району міста	74
3.4 Планування мереж LTE/5G в середовищі Atoll	75
3.5 Розрахунок енергетики радіоліній	81
3.6 Розрахунок ємності системи LTE	84
3.7 Вибір обладнання для розгортання мережі 5G	86
3.8 Дослідження ефективності агрегації носіїв	88
РОЗДІЛ 4	
РОЗРОБКА СТАРТАПУ	91
4.1 Опис ідеї проекту	91
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	93
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту	94
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	99
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	101

Висновки до розділу	104
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ	105
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	106

ВСТУП

На даний час безпроводові мережі передачі інформації є одним з основних напрямків розвитку інфокомунікацій. У порівнянні з раніше розробленими системами 5G забезпечує покращені технічні характеристики, включаючи максимальну швидкість передачі даних понад 10 Гбіт/с, час затримки пересилання пакетів менше 1 мс, а також значно вищу спектральну ефективність. Системи 5G можуть надавати значно більший спектр послуг і їх можна буде задіяти як в нових, так і в уже наявних у операторів частотних смугах (до 6 ГГц та вище).

На сьогоднішній день можна відзначити бурхливе зростання обсягу трафіку в мережах рухомого зв'язку 4 покоління, і щоб забезпечити необхідну швидкість всім своїм абонентам, операторам доводиться шукати різні методи щодо підвищення швидкості передачі даних або щодо підвищення ефективності використання частотного ресурсу. Крім пропускну здатності, важливою характеристикою системи є ймовірність бітової помилки, яка впливає на використовувані алгоритми модуляції та кодування. Тому необхідно постійно підтримувати баланс між цими двома важливими для користувача характеристиками. Цього можна досягти за рахунок удосконалення методів та моделей розподілу ресурсів, а також ефективного планування мережі, тому підвищення якості надання послуг у мережах 5G на основі підвищення ефективності розподілу ресурсів та удосконалення сервісної архітектури є **актуальною науковою задачею**.

Для вирішення вказаної задачі, необхідно виконати планування 5G мережі, що включає вимірювання параметрів та детальне планування мережі.

РОЗДІЛ 1 ОСОБЛИВОСТІ РАДІОМЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

1.1 Аналіз розвитку безпроводових телекомунікаційних мереж

Зв'язок четвертого покоління почали розробляти ще в 2000 році. В цей час вже з'явився стандарт 3G. Дослідження в галузі зв'язку показали, що з усього різноманіття технологій і стандартів 4G прийнятними для розгортання можуть бути тільки два: LTE і мобільна версія WiMAX.

LTE спочатку розроблявся у вигляді доповнення до стільникових мереж 3G, а WiMAX «виріс» із бездротових мереж передачі даних, і голосовий зв'язок був для нього основним завданням. Саме LTE набув популярності у операторів мобільного зв'язку: його легко розгорнути на базі мереж попередніх поколінь.

Першими точками на карті LTE стали Стокгольм і Осло: 14 грудня 2009 року TeliaSonera запустила мережу 4G в цих містах. Тоді Томас Йонссон, представник TeliaSonera, розповідав, що інвестиції в проект були істотно нижче, ніж при переході від 2G до 3G. За його словами, економія була досягнута за рахунок того, що LTE можна розгорнути на існуючій інфраструктурі 3G.

На кінець 2013 року в світі було розгорнуто 265 мереж 4G, а вже 10 червня 2014 року цей показник досяг 300 мереж - в 107 країнах світу. Таку статистику наводить GSA.

У світі найбільшого поширення набули LTE-мережі, що працюють в діапазоні частот 1800 МГц: 129 таких мереж 4G (52%) було розгорнуто в 67 країнах світу. Другий за популярністю діапазон - 2,6 ГГц (25,6%), далі йдуть 800 МГц (14,3%) і AWS (8,3%).

Користувачі LTE у середньому витрачають на місяць 1,5 Гб даних. Цей показник у два рази вище, ніж у тих, хто LTE не використовує. Дослідження GSMA Intelligence, що засновані на результатах опитування різних операторів, свідчать про те, що абоненти 4G можуть створювати ARPU від 7

до 20 разів більше, ніж звичайні клієнти мобільних операторів. LTE на розвинених ринках може підняти ARPU на 10-40%.

Запуск мереж 4G у цілому позитивно вплинув як на операційні показники операторів, так і на зростання споживання мобільного трафіку. За рахунок збільшення обсягів споживання мобільного інтернету мережа «четвертого покоління» може збільшити ARPU на 35-40% .

Впровадження мережі LTE в Україні

У нашій країні відбувся розподіл частот для організації мереж четвертого покоління між операторами зв'язку. Фактично буде «два LTE» - першим з'явиться FDD 2600 (Band 7), другим - FDD 1800 (Band 3). Мережі першого типу розгорнуті в містах з високою щільністю населення, на кшталт Києва, Харкова, Дніпра, тоді як основу по всій території склали саме мережі FDD 1800 (Band 3).

Усі три найбільші оператори мобільного зв'язку - Lifecell, «Київстар» і Vodafone - отримали смуги радіочастот у діапазоні 2,5-2,6 ГГц, в цілому виклавши за них 2,456 млрд грн.

Найдорожчий лот, що включає частоти 2540-2545, 2565-2670/2660-2665 і 2865-2690 МГц, купив Lifecell. Причому оператор запропонував несподівано високу ціну - 601,6 млн грн при стартових 572 млн грн. Vodafone, який також претендував на цей лот, підвищувати ставку не захотів. Другий лот, що включає смуги 2535-2540/2655-2660 МГц, теж отримав Lifecell, заплативши за нього 307,65 млн грн. Тобто в цілому Lifecell витратив 909,25 млн грн за дві смуги шириною 15 МГц. «Київстар» взяв три лоти загальною шириною 15 МГц у діапазоні 2530-2535/2650-2655, 2525-2530/2645-2650 і 2520-2525/2640-2645 МГц, сумарно виклавши за них 916,3 млн грн.

Vodafone дісталось всього два лоти в діапазоні 2510-2515 / 2630-2635 і 2515-2520/2635-2640 МГц, витративши 631 млн грн за смугу шириною 10 МГц.

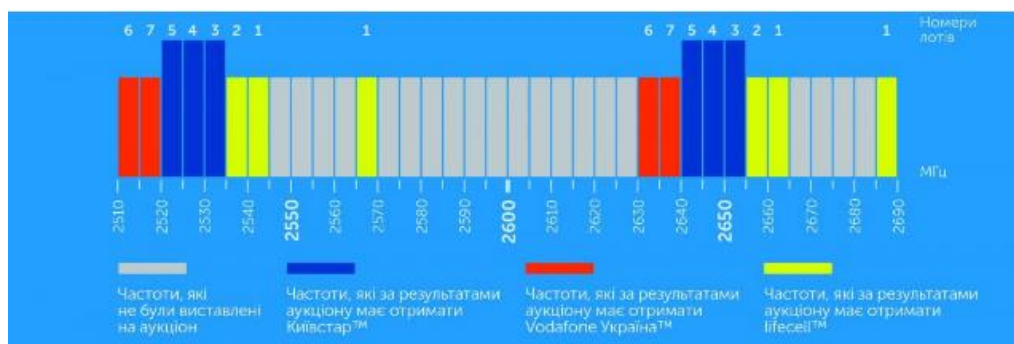


Рис. 1.1. Розподіл частотного спектру в діапазоні 2600 МГц

Діапазон 1800 МГц – найбільш універсальний для розвитку технології 4G / LTE. У світі вже більше 580 комерційних мереж 4G зв'язку, з них 272 мережі - на частотах 1800 МГц. Отримавши можливість розвивати послуги стандарту 4G на частотах 1800 МГц, оператори зможуть використовувати інші радіочастоти (наприклад, 2,6 ГГц) для подальшого збільшення ємності. Саме за частоти даного діапазону оператори мобільного зв'язку України вели посилену боротьбу на тендері. Результат торгів представлено на рис. 1.2.



Рис. 1.2. Розподіл частотного спектру в діапазоні 1800 МГц

1.2. Аналіз технічних особливостей мережі LTE

1.2.1 Архітектура мережі LTE

На даний час сучасні технології розвиваються в одному напрямку: до систем на базі OFDM-MIMO і далі до систем п'ятого покоління. У стільникових технологіях одна чітка тенденція - міграція в бік LTE, стандарту 3GPP.

Технологія LTE забезпечує теоретичну пікову швидкість передачі даних до 326,4 Мбіт/с від базової станції до користувача (де-факто 5-10 Мбіт/с) і до 172,8 Мбіт/с у зворотньому напрямку. Для порівняння, мережі другого покоління (2G) теоретично здатні забезпечити пікову швидкість передачі даних за допомогою технології GPRS 56-114 Кбіт/с, а допомогою EDGE до 473,6 Кбіт/с. Мережі третього покоління (3G) забезпечують швидкість передачі даних до 3,6 Мбіт/с. Реальна ж швидкість передачі даних користувачам LTE у смузі частот шириною 20 МГц становить до 150 Мбіт/с (у разі застосування MIMO 2x2), а в зворотньому напрямку - до 75 Мбіт/с.

Основною перевагою LTE є те, що вона будується на базі існуючого обладнання з порівняно легкою інтеграцією GSM і WCDMA, тому мережа LTE підтримує існуючі абонентські пристрої 2G і 3G. Цього позбавлені мережі WiMAX, які, так само як мережі LTE, відносяться до четвертого покоління.

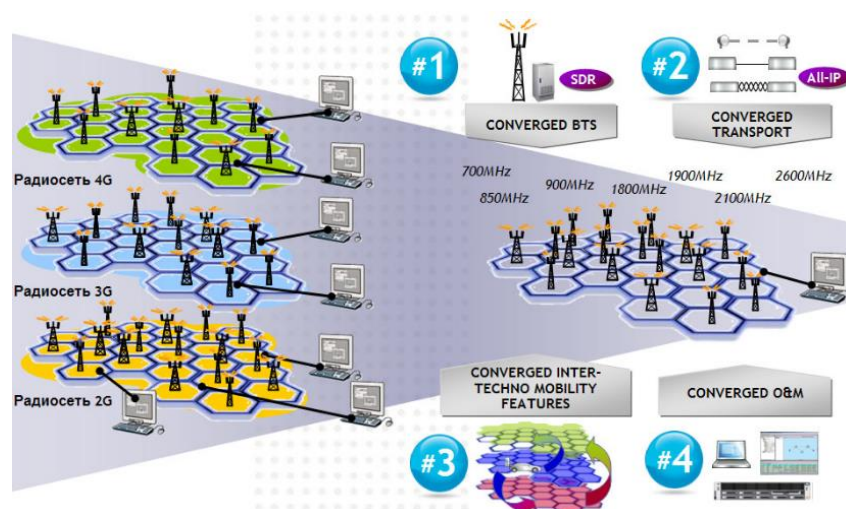


Рис. 1.3. Особливості побудови мережі

У міру розвитку мереж LTE все більш актуальними стають питання тестування інфраструктури цих мереж. Тестування мережі LTE необхідно проводити протягом усього життєвого циклу, починаючи із запуску мережі в експлуатацію. Розглянемо коротко її архітектуру.

Мережа LTE складається з наземної підсистеми радіодоступу E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network), яку утворюють вузли eNodeB - базові станції LTE, і пакетного ядра EPC (Evolved Packet Core). Вузли eNodeB здійснюють радіообмін з одними пристроями UE (User Equipment), використовуючи технології OFDMA і SC-FDMA.

Вузол eNodeB не тільки реалізує фізичний рівень мережі LTE, а й виконує безліч інших важливих мережевих функцій: управління радіоресурсами (включаючи контроль доступу до мережі й динамічне виділення користувачам ресурсів у прямому та зворотньому каналах), стиснення заголовків IP-пакетів і шифрування потоків даних, передачу (за допомогою телефону Uu) пейджингових і широкомовних повідомлень, маршрутизацію призначених для користувача даних до SGW і ін.

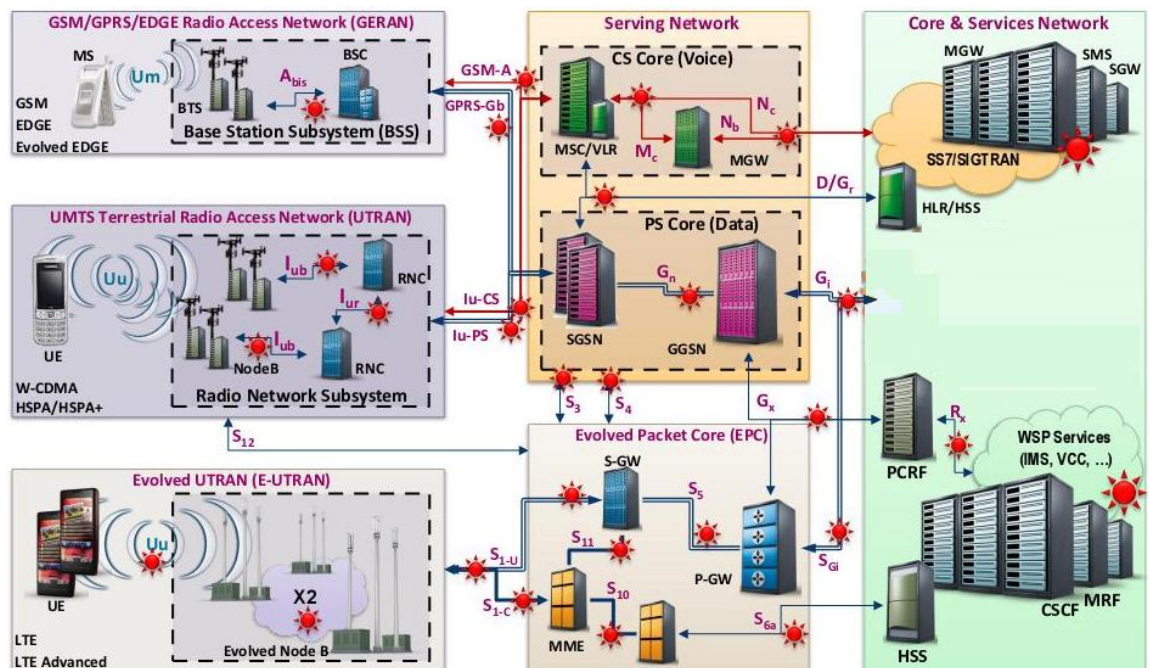


Рис. 1.4. Архітектура мобільних систем зв'язку

Вузол MME забезпечує сигналізацію в площині управління між EPC і UE, а також забезпечує мобільність UE, включаючи роумінг між мережею LTE і мережами UTRAN (UMTS) і GERAN (GSM).

Крім маршрутизації пакетів даних між PGW і E-UTRAN шлюз SGW служить «якорем» мобільності при здійсненні хендовера між вузлами eNodeB та в режимі роумінгу між мережею LTE і мережами 2G/3G. Крім того, SGW керує контекстами UE та ініціює виклики неактивних UE, коли надходять призначені для них дані.

Шлюз PGW забезпечує зв'язок UE з зовнішніми пакетними мережами і реалізує правила системної політики, фільтрує пакети для кожного користувача з аналізом цих пакетів, тарифікує послуги, що надаються та є «якорем» мобільності при інтеграції з мережами доступу, що не відносяться до мереж 3GPP (WiMAX і CDMA2000).

1.2.2 Фізичний рівень LTE

До фізичного рівня LTE пред'являються найвищі вимоги: швидкість передачі 100 Мбіт/с в низхідному каналі й 50 Мбіт/с у висхідному, ефективне використання спектра, кілька частотних каналів на смузі 1,25 ... 20 МГц. Для виконання цих вимог була обрана технологія мультиплексування з ортогональним частотним поділом сигналів (OFDM). Крім того, в мережах LTE використовується принцип «багато входів - багато виходів» (MIMO), який дозволяє збільшити ємність каналу (просторове мультиплексування) і підвищити надійність сигналу.

Разом ці дві технології відрізняють LTE від мереж 3G, заснованих на множині доступу з кодовим поділом (CDMA). Оскільки всі аспекти фізичного рівня LTE охопити важко, розглянемо принцип роботи в частотній області (FDD).

1.2.3 Методи множинного доступу

У низхідному каналі застосовується принцип мультиплексування з ортогональним частотним поділом сигналів (OFDM). Він полягає в тому, що весь доступний частотний діапазон ділиться на кілька тисяч піднесучих, за якими дані передаються паралельно. Ортогональність частот забезпечує відсутність межсимвольної інтерференції. За рахунок поділу каналу на вузькі смуги сигнал, який передається загасає плавно, що дозволяє відмовитися від використання складних частотних коректорів. Системи зв'язку, засновані на OFDM, повинні бути строго лінійними, щоб не порушувалася ортогональність переданих сигналів.

Кожному передавачу виділяються певні смуги спектра так, щоб знизити рівень шумів і уникнути виникнення інтерференційних перешкод. Вихідний потік послідовних даних перетворюється в паралельний, причому швидкість передачі в кожному каналі зменшується пропорційно кількості каналів. У результаті швидкість передачі всього потоку не змінюється, проте збільшується час передачі кожного біта, за рахунок чого зменшується ймовірність появи помилки і спотворень.

Інформаційні символи модулюються та комбінуються в передавачі блоком зворотнього швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). У приймачі виробляється відновлення потоку даних (пряме ШПФ).

Зазвичай у каналі присутня тимчасова дисперсія - частини переданого сигналу приймаються з різними затримками через багатопроміневість поширення і відображень. У результаті ортогональність частково втрачається, з'являється інтерференція як між бітами всередині символу, так і між символами. Для запобігання перекриття в початок OFDM-символу вставляється циклічний префікс T_g , що містить кінцеві біти попереднього символу. При цьому загальна довжина символу дорівнює $T_s = T_u + T_g$, де T_u – «корисна» довжина OFDM-символу.

Переваги технології OFDM:

1. Нечутливість до багатопроміневісті поширення сигналу та слабка

інтерференція в каналі.

2. Відсутність інтерференції між осередками мережі.
3. Гнучке використання частотного спектру.
4. Ефективне використання спектра за рахунок ортогональності піднесучих.
5. Оптимальна швидкість передачі даних для всіх абонентів осередку (для передачі вибирається найбільш підходяща піднесуча зі слабким завмиранням).

Незважаючи на незаперечні переваги OFDM-технології, у неї є ряд недоліків. По-перше, велика чутливість до нестабільності частоти, яка може виникнути через неідеальність схеми або ефекту Доплера, якщо пристрій рухомий. По-друге, високе відношення пікової потужності до середньої, обумовлене непослідовним додаванням піднесучих, яке розширює спектр сигналу і, відповідно, викликає інтерференцію в каналі.

У висхідному каналі використовується множинний доступ з частотним поділом на базі однієї несучої (Single Carrier Frequency Division Multiple Access, SC-FDMA) з циклічним префіксом, щоб знизити відношення пікової потужності до середньої. Низькі значення PARP, крім того, покращують покриття і продуктивність осередку.

Технологія SC-OFDMA реалізується в LTE за допомогою дискретного перетворення Фур'є (DFTS-OFDM - Discrete Fourier Transform Spread OFDM), яке часто називають узагальненням SC-FDMA в частотній області. Дискретне перетворення Фур'є використовується для мультиплексування висхідних передач в окремі частотні блоки, на які розбивається смуга пропускання. Займана однієї несучою, смуга визначається на основі необхідної швидкості передачі. Дані залишаються послідовними й не розпаралелюються, як це відбувається в низхідному каналі. У результаті, параметри з'єднання стають однаковими в обох напрямках. Однак, у висхідному каналі спостерігається досить сильна міжсимвольні інтерференція, яка легко коригується еквалайзером. Сигнал SC-FDMA позбавлений недоліків OFDM.

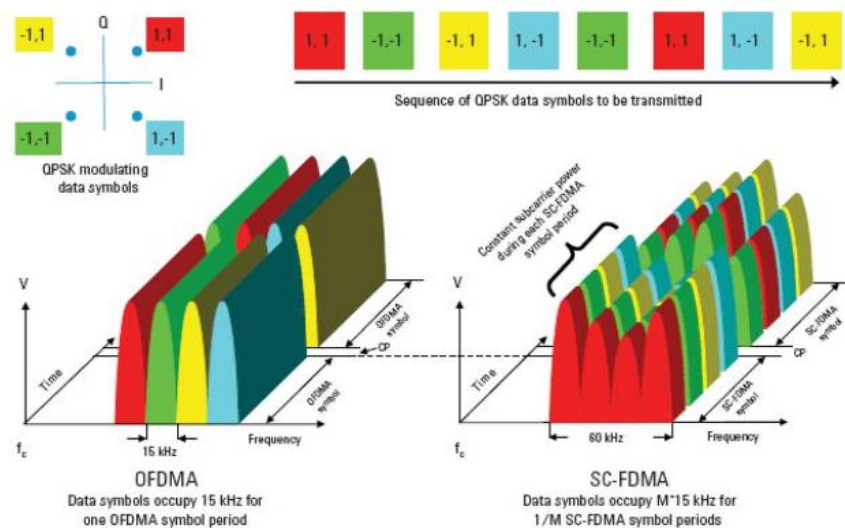


Рис. 1.5. Порівняння OFDMA і SC-FDMA

У часовій області все проміжки часу виражаються через базовий інтервал $T_s = 1/30720000$. Тривалість пакета дорівнює 10 мс ($T_{\text{frame}} = 307200 T_s$). Кожен пакет розділений на 10 однакових субкадра тривалістю 1 мс ($T_{\text{subframe}} = 30720 T_s$). У свою чергу, субкадр складається з двох слотів по 0,5 мс ($T_{\text{slot}} = 15360 T_s$), що містять 7 або 6 символів OFDM в залежності від типу циклічного префікса (нормальний або розширений).

Стандарт LTE передбачає два типи радіокадрів - для частотного (FDD) і тимчасового дуплексування (TDD).

Технологія побудови мереж бездротового покоління 4G, наступного за 3G, на базі IP-технологій, що відрізняється високими швидкостями передачі даних.

LTE може використовуватися, як в парних (FDD), так і в непарних (TDD) ділянках спектра. Перші релізи продукту від лідируючих постачальників забезпечують підтримку обох дуплексних схем. В цілому, FDD - забезпечує більшу ефективність і представляє більш вищий потенціал використання пристроїв і інфраструктури, тоді як TDD може виконувати роль хорошого доповнення, наприклад, для заповнення прогалів в мережі.

Оскільки обладнання LTE практично ідентично для випадків FDD і TDD (крім фільтрів), оператори, які почнуть спорудження мереж TDD, зможуть

згодом скористатися ефектом економії на масштабі, який забезпечить широке поширення продуктів FDD.

До 2011 року всі мобільні системи зв'язку використовували FDD, і більше 90% частот, що використовуються системами мобільного зв'язку в усьому світі - це парні набори смуг частот. У разі FDD, трафік вниз і вгору забезпечується одночасно в різних частотних діапазонах. У системах TDD, передача в каналі вгору і вниз не ведеться безперервно, що дозволяє використовувати для організації каналу один і той же частотний діапазон. Наприклад, якщо розділити час між передачею вгору і вниз в співвідношенні 1:1, то напрямком вгору буде використовуватися лише половину часу. Середня потужність для кожного сеансу зв'язку також, виявляється, дорівнює половині пікової потужності. Оскільки пікова потужність обмежена регулятором, то в результаті виходить, що для тієї ж пікової потужності, TDD забезпечує менше покриття, ніж FDD.



Рис. 1.6. Порівняння FDD і TDD

Більш того, оператори часто хотіли б виділити більш, ніж половину своїх ресурсів для організації каналу вниз (щоб підвищити пікову швидкість в цьому напрямку). Якщо співвідношення DL / UL одно 3:1, то для реалізації мережі TDD буде потрібно на 120% більше сайтів, ніж для реалізації мережі FDD.

LTE базується на трьох основних технологіях: мультиплексування за допомогою ортогональних несучих OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing), багатоантенні системи MIMO (Multiple Input Multiple Output) і еволюційна системна архітектура мережі (System Architecture Evolution).

Принципово, що дуплексне розділення каналів може бути як частотним

(FDD), так і часовим (TDD). Це дозволяє операторам дуже гнучко використовувати частотний ресурс. Таке рішення відкриває шлях на ринок тим компаніям, які не володіють сприянням частотами. З іншого боку, підтримка FDD дуже зручна для традиційних стільникових операторів, оскільки в них спарені частоти є «за визначенням» - так організовані практично всі існуючі системи стільникового зв'язку. Сама ж по собі система FDD істотно більш ефективна в плані використання частотного ресурсу, ніж TDD, - в ній менше накладних витрат (службових полів, інтервалів і т.п.) .

Обмін між базовою станцією (БС) і мобільною станцією (МС) будується за принципом циклічно повторюваних кадрів (в термінології LTE - радіокадр). Тривалість радіокадра - 10 мс. Всі тимчасові параметри в специфікації LTE прив'язані до мінімального тимчасового кванта $T_s = 1 / (2048 \cdot \Delta f)$, де Δf - крок між поднесучими, стандартно - 15 кГц. Таким чином, тривалість радіокадра - $307200T_s$. Сам же квант часу відповідає тактовій частоті 30,72 МГц, що кратно стандартної в 3G-системах (WCDMA зі смугою каналу 5 МГц) частоті обробки 3,84 МГц ($8 \times 3,84 = 30,72$).

Стандарт LTE передбачає два типи радіокадров. Тип 1 призначений для частотного дуплексування - як для повного дуплексу, так і для напівдуплексу. Такий кадр складається з 20 слотів (тривалістю 0,5 мс), нумерованих від 0 до 19. Два суміжних слота утворюють субкадр (рис 1.9). При повнодуплексному режимі радіокадри у висхідному і низхідному каналах передаються паралельно, але з обумовленим в стандарті тимчасовим зрушенням.

Як уже зазначалося, уLTE використовується модуляція OFDM, яка добре досліджена в системах DVB, Wi-Fi і WiMAX. Нагадаємо, технологія OFDM передбачає передачу широкосмугового сигналу за допомогою незалежної модуляції вузькосмугових піднесучих виду $S_k(t) = a_k \cdot \sin [2\pi (f_0 + k\Delta f)]$, розташованих з певним кроком по частоті Δf . Один OFDM-символ містить набір модульованих піднесучих. У тимчасовій області OFDM-символ включає поле даних (корисна інформація) і так званий циклічний префікс CP

(CyclicPrefix) - повторно переданий фрагмент кінця попереднього символу (рис.1.11) Призначення префікса - боротьба з міжсимвольною інтерференцією в приймачі внаслідок багатопроміневого поширення сигналу. Відбитий сигнал, що приходить із затримкою, потрапляє в зону префікса і не накладається на корисний сигнал. У LTE прийнятий стандартний крок між піднесучими $\Delta f = 15$ кГц, що відповідає тривалості OFDM-символу 66,7 мкс.

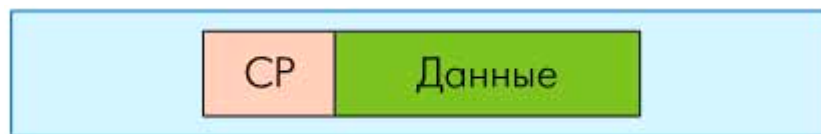


Рис. 1.7. OFDM-символ з циклічним префіксом

Кожному абонентському пристрою (АУ) у кожному слоті призначається певний діапазон каналних ресурсів у частотно-часовій області (рисунок 1.14) - ресурсна сітка. Осередок ресурсної сітки - так званий ресурсний елемент - відповідає одній піднесучій частотній області та одному OFDM-символу - у тимчасовій. Ресурсні елементи утворюють ресурсний блок - мінімальну інформаційну одиницю в каналі. Ресурсний блок займає 12 піднесучих (тобто 180 кГц) і 7 або 6 OFDM-символів, в залежності від типу циклічного префікса (табл.2) - так, щоб загальна тривалість слота становила 0,5 мс. Число ресурсних блоків NRB у ресурсній сітці залежить від ширини смуги каналу і становить від 6 до 110. Ресурсний блок - це мінімальний ресурсний елемент, що виділяється для абонентського пристрою планувальником базової станції. Про розподіл ресурсів в кожному слоті базова станція повідомляє в спеціальному керуючому каналі.

Тривалість префікса 4,7 мкс дозволяє боротися із затримкою відбитого сигналу, що пройшов шлях на 1,4 км більше, ніж сигнал, що поширюється прямо. Для систем стільникового зв'язку в умовах міста цього зазвичай цілком достатньо. Якщо ж ні – використовується розширений префікс, що забезпечує придушення міжсимвольної інтерференції в

осередках радіусом до 120 км.

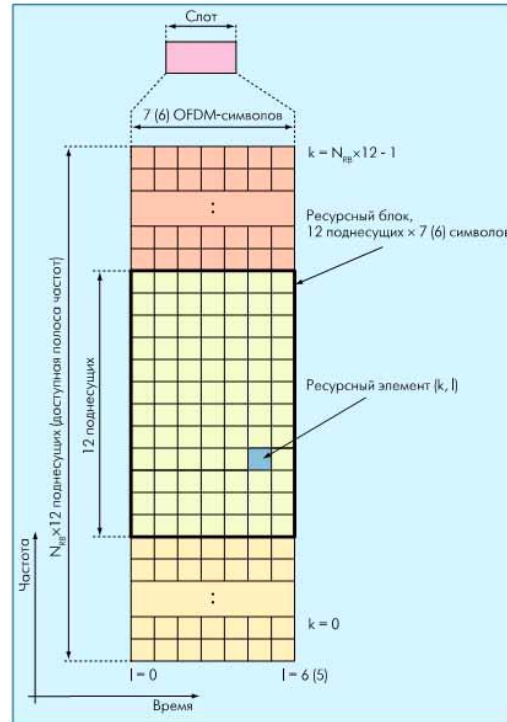


Рис.1.8. Ресурсна сітка LTE при стандартному кроці піднесучої
 $\Delta f = 15 \text{ кГц}$

Такі величезні осередки корисні для різного роду широкомовних сервісів (MBMS), таких як мобільне ТБ-мовлення. Для цих же режимів (лише в низхідному каналі) передбачена особлива структура слота, з кроком між поднесучими 7,5 кГц і циклічним префіксом 33,4 мкс. У слоті при цьому всього три OFDM-символу.

Таблиця 1.1

Фізичний префікс у низхідному каналі при $\Delta f = 15 \text{ кГц}$

Тип префіксу	Довжина префіксу		Довжина слота, OFDM – символів
	T_s	мкс	
Стандартний:			7
Перший символ слота	160	5,2	
Інші 6 символів слота	144	4,7	
Розширений	512	16,7	6

Кожна піднесуча модулюється за допомогою 4-, 16- і 64-позиційної квадратурної фазово-амплітудно модуляції (QPSK, 16-QAM або 64-QAM). Відповідно, один символ на одній піднесучій містить 2, 4 або 6 біт. При стандартному префіксі символна швидкість складе 14000 символів/с, що відповідає, при FDD-дуплексі, агрегатної швидкості від 28 до 84 кбіт/с на піднесучу. Сигнал зі смугою 20 МГц містить 100 ресурсних блоків або 1200 піднесучих, що дає загальну агрегатную швидкість у каналі від 33,6 до 100,8 Мбіт/с.

Специфікації LTE визначають декілька фіксованих значень для ширини висхідного і низхідного каналів між БС і АС (в мережах E-UTRA) (табл.3). Оскільки в OFDM використовується швидке перетворення Фур'є (ШПФ), число формальних піднесучих для спрощення процедур цифрової обробки сигналу повинно бути кратним $N = 2n$ (тобто 128, 256, ..., 2048). При цьому, частота вибірок повинна становити $F_s = \Delta f \cdot N$. При заданих у стандарті значеннях вона виявляється кратною 3,84 МГц - стандартній частоті вибірок у технології WCDMA. Це дуже зручно для створення багатомодових пристроїв, що підтримують як WCDMA, так і LTE. Зрозуміло, при формуванні сигналу амплітуди «зайвих» піднесучих (включаючи центральну піднесучу каналу) вважаються рівними нулю.

Таблиця 1.2.

Параметри каналу передачі між БС

Ширина каналу, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Число ресурсних блоків	6	15	25	50	75	100
Число під несучих	72	180	300	600	900	1200
Число номінальних несучих для БПФ	126	256	512	1024	1536	2048
Тактова частота для БПФ, МГц	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	3072

1.3. Аналіз технічних особливостей мережі 5G

На відміну від 4G, новітні мережі 5G мають більші широкі сфери застосування. Перелічимо основні з них.

Ультранадійний зв'язок із низькою затримкою (URLLC) – це набір функцій, які забезпечують низьку затримку та надвисоку надійність для критично важливих додатків, таких як промисловий Інтернет, розумні мережі, віддалена хірургія та інтелектуальні транспортні системи. Дизайн служби із низькою затримкою та високою надійністю включає декілька компонентів: інтегровану структуру кадру, неймовірно швидкий перебіг, ефективний контроль та спільний доступ до ресурсів даних, передачу висхідної лінії зв'язку на базі без грантів та вдосконалені схеми кодування каналів. Але проектування фізичного рівня буде найскладнішим завданням, оскільки задоволення низької затримки та надвисокої надійності - дві суперечливі вимоги одночасно є непростим завданням.

eMBB (enhanced mobile broadband) – «розширений мобільний широкосмуговий зв'язок» об'єднує багато речей, таких як пропускна здатність мережі та пікові швидкості передачі даних у постійно мінливій сфері споживчих потреб та потреб. eMBB повинен охоплювати не лише різноманітне сьогодення, але й майбутнє, яке буде слідувати за споживачами.

mMTC (Massive Machine-type Communication) – має на меті забезпечити підключення до величезної кількості пристроїв, профіль трафіку яких, як правило, становить невеликий обсяг даних (поширюється) епізодично. Отже, затримка та пропускна здатність не становлять великого занепокоєння. Головною проблемою є оптимальне використання енергії цих пристроїв, оскільки вони живляться від батареї, і очікуваний час автономної роботи становить близько 10 років.

DualConnectivity – подвійне підключення, що дозволяє операторам одночасно надавати LTE і 5G в одному спектрі. При подвійному підключенні телефон приймає окремо сигнали LTE та 5G, а потім агрегує потоки.

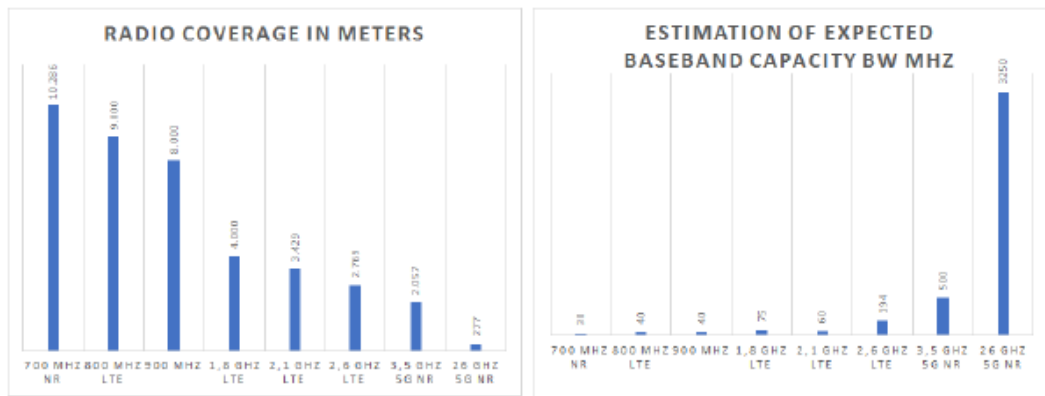


Рис. 1.9. Оцінка радіохвилі та пропускної здатності базової смуги для декількох частот 5G NR

1.4 Аналіз особливостей модернізації мереж зв'язку від LTE до 5G

5G можна ввести як в автономному режимі за допомогою 5GC (5GCore), так і в не автономному режимі, використовуючи EPC 4G або 5GC.

Отже, існує кілька можливих “шляхів”, якими можуть слідувати оператори, щоб спочатку ввести 5G, а потім перенести його до цільової конфігурації. Виконаємо аналіз можливих сценаріїв впровадження та міграції. У якості попередніх даних передбачається, що оператор:

- розгорнув повну 4G-систему, що включає EPC та LTE-доступ;
- планує мігрувати в середньо- або довгостроковій перспективі до 5GC.

1.4.1 Варіант від EPS до SA

У цьому сценарії оператор переходить безпосередньо з EPS на автономний 5G за допомогою механізмів мобільності inter-RAT, що використовуються для переміщення пристроїв між 4G LTE під покриттям EPC та 5G NR під покриттям 5GC. Однією з ключових переваг цього варіанту є те, що архітектура SA може повною мірою скористатися можливостями кінцевої мережі 5G, підтримуваної NR і 5GC, забезпечуючи ефективне та ефективне обслуговування, особливо для вертикальної галузі. Нові функції,

включаючи архітектуру, засновану на послугах, нарізання наскрізних мереж (NetworkSlicing) та MEC (MobileEdgeComputing), можна ввімкнути відповідно до конкретних вимог кожної служби, забезпечуючи індивідуальний досвід користувача.

На початку розгортання не розглядається пряма взаємодія між доменами 5GS та 2G / 3GCS (рис.1.10.). Оскільки подвійне підключення не потрібно, робоче навантаження та вартість існуючого оновлення та модифікації eNB 4G є відносно низькими, лише незначні оновлення необхідні для підтримки взаємодії з 5G. Якщо оператор надає покриття VoLTE (VoiceoverLTE) то можна надавати голосові послуги IMS через мережу 5G (5GS), або використовувати існуючу послугу VoLTE

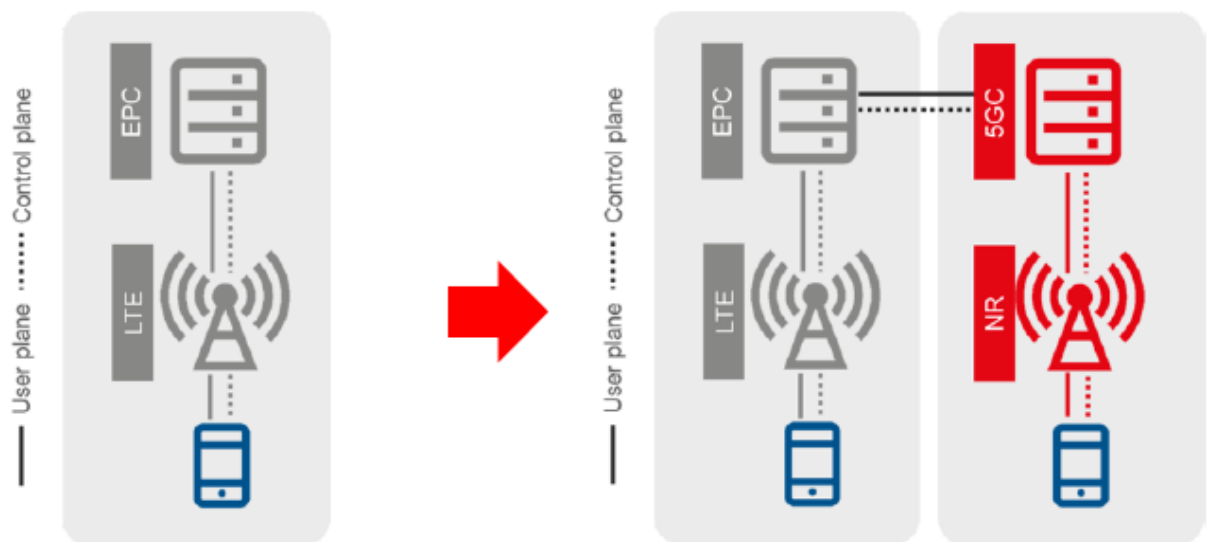


Рис.1.10.Описваріантавід EPSдоSA

1.4.2 Варіант від EPS до NSA

Цей варіант описує перехід з EPS на автономну мережу з розширеною EUTRA, що дозволяє сумісним пристроям використовувати подвійне підключення для поєднання радіодоступу LTE та NR. Однією з ключових переваг цього варіанту є те, що він вимагає лише розробки специфікацій NR як не автономного доступу як частини E-UTRAN, підключеного до EPC, а не специфікації повної системи 5G.

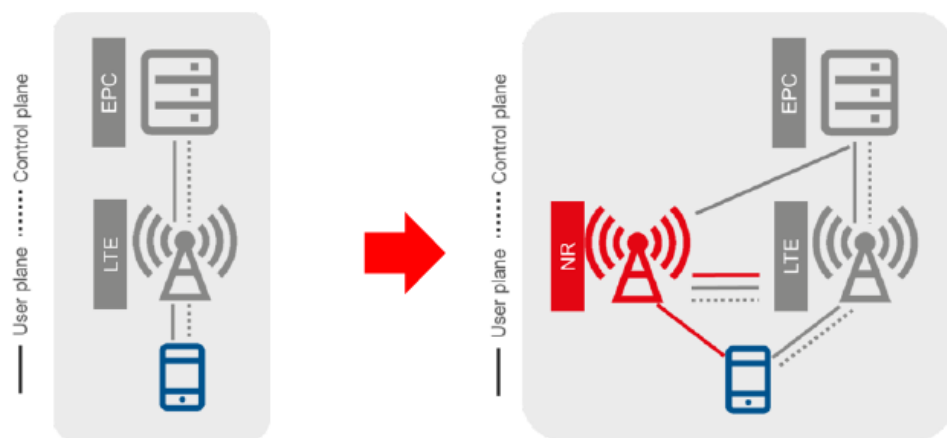


Рис.1.11.ОписваріантаEPSдоNSA

1.4.3 Варіант від EPS до NSA та SA

Цейваріант можливий за умовипереходувіднестандартногодонесамостійноготаавтономного5GзпідключеннямRANдо 5GСпаралельнодопідключенняEPSдляранніхпристроїв 5G.

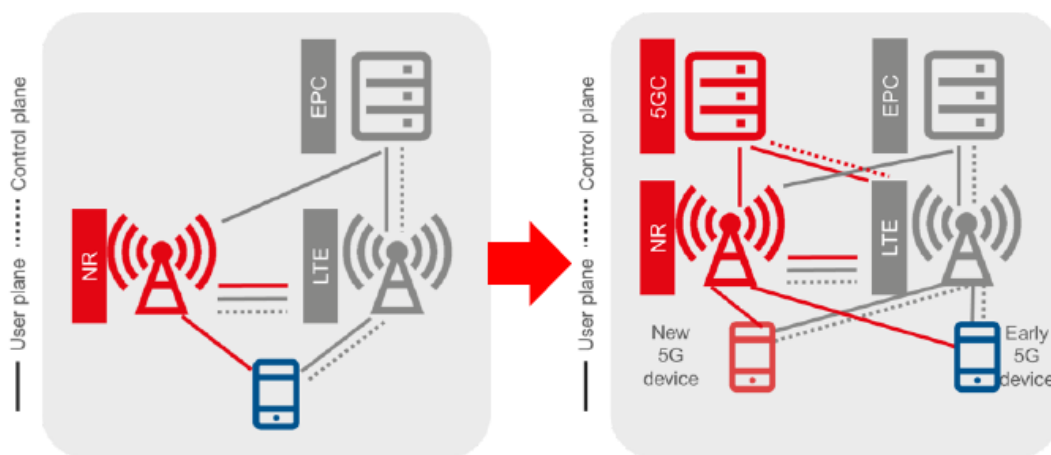


Рис. 1.12. Опис варіанта від EPSдо NSA та SA

Хоча мережа не змогла скористатися перевагами 5GC в NSA, на цьому шляху 5GC розгортається таким чином, щоб усі переваги наскрізних можливостей мережі 5G могли бути надані користувачам. Цей шлях дозволяє операторам надавати початкові випадки використання 5G (наприклад, мобільний широкосмуговий доступ), використовуючи встановлену базу LTE та EPC.

Висновки:

В основі роботи покладена технологія 5G, що будується на базі існуючого обладнання з порівняно легкої інтеграцією LTE і WCDMA. Метою створення стандарту наступного покоління 5G можна назвати нарощування можливостей високошвидкісних систем мобільного зв'язку, зменшення вартості передачі даних, розширення спектра послуг, що надаються.

РОЗДІЛ 2

АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ПАРАМЕТРІВ РАДІОІНТЕРФЕЙСУ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ МЕРЕЖІ 5G

Питання планування мереж 5G недостатньо вивчені, у цій області малий практичний досвід і недостатньо експериментальних даних.

З цієї причини обмежимося виявленням особливостей технологій, які можуть надати явний вплив на планування мереж, а також опишемо очікувані особливості самого процесу планування.

2.1 Основні складові мереж 5G

2.1.1 Агрегація несучих та подвійне підключення

Агрегація несучих (CA) була введена в 3GPP, щоб дозволити UE одночасно передавати та приймати дані на декількох компонентних носіях від одного eNB. CA може збільшити пропускну здатність користувачів із збільшенням сукупної пропускну здатності.

Подвійне підключення (DC) було введено в 3GPP, щоб дозволити UE одночасно передавати та приймати дані про багатокомпонентні носії з двох груп комірок через головний eNB (MeNB) та вторинний eNB (SeNB). DC може збільшити пропускну здатність користувачів, забезпечити надійність мобільності та підтримувати балансування навантаження серед eNB.

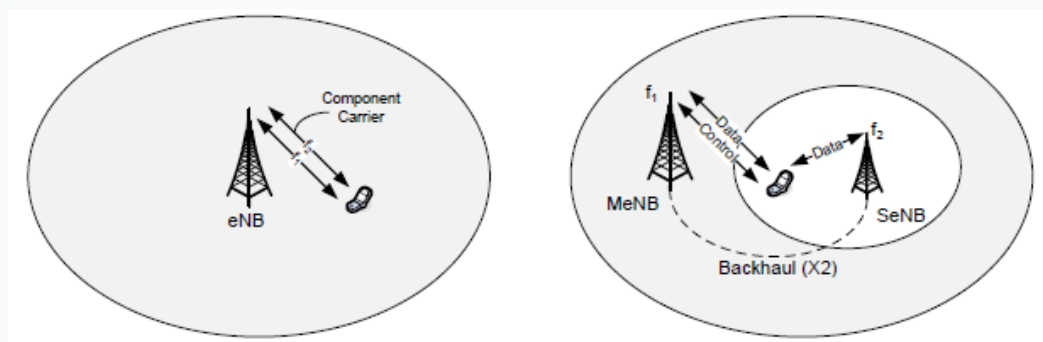


Рис. 2.1 – Подвійне підключення

2.1.2 NetworkSlicing і віртуалізація мережних функцій (VNF)

Network Slicing (NS) є основним, але складним атрибутом мережі 5G. Відповідно до NGMN, NS визначається як набір мережеских функцій та ресурсів для запуску цих мережеских функцій, утворюючи повноцінну інстанційовану логічну мережу для задоволення певних характеристик мережі, що вимагаються екземпляром служби. Іншими словами, NS - це основний субстрат, пропонується операторами мобільних мереж, з яких здійснюється безліч підприємств послуги розгортаються та працюють ефективно та економічно. Віртуалізація - ключова технологія активатор для реалізації повністю або частково ізольованого екземпляра NS (NSI). Він абстрагує ресурси фізичної та віртуальної інфраструктури, такі як обчислення, мережа, пам'яті та сховища, пропонуючи логічні ресурси із налаштованими параметрами політики та конфігурації. Такі логічні ресурси потім призначаються різним орендарям, наприклад, вертикалі, які утворюють віртуалізовані функції та накладене підключення, що відповідає бажаним потребам обслуговування. Віртуальна мережева функція (VNF) може містити прості мережескі функції, наприклад, віртуальний брандмауер або більш складні, наприклад, віртуальна мобільна основна мережа. Функція віртуалізованої мережі (VNF) може містити прості мережескі функції, наприклад, віртуальний брандмауер або більш складні, наприклад, віртуальне ядро мобільної мережі. Кожному VNF присвоюється певний тип і сума віртуалізованих ресурсів. VNF з'єднані між собою в порядку накладення топології мережі над чітко визначеними віртуальними або логічними посиланнями для створення повноцінного NSI. NSI, як правило, складається з декількох екземплярів підмереж Network Slicing (NSSI), що представляють групу екземплярів мережеских функцій та логічного підключення. NSSI є частиною або повними складовими NSI.

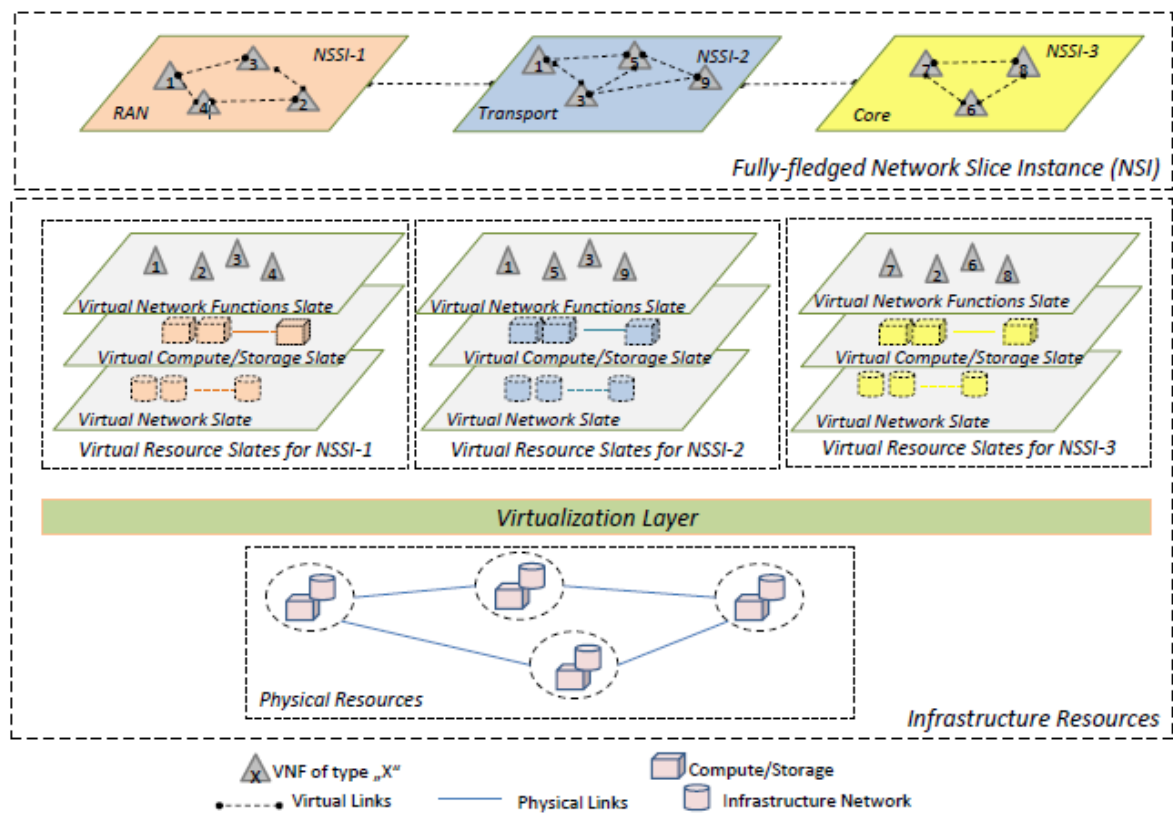


Рис. 2.2 Склад повноцінного екземпляра мережевого фрагмента

Рис. 2.2 ілюструє концепцію та склад повнофункціональної NSI, який складається з трьох NSSI, кожен з яких належить до іншої технологічної області, наприклад, мережі радіодоступу (RAN), транспорту та ядра. RAN і ядро NSSI складаються з взаємопов'язаних VNF над логічними транспортними зв'язками. NSSI може самостійно бути повноцінним NSI, але тоді кілька NSSI зшиті разом можуть розширити сферу послуг і тим самим створити новий вдосконалений повнофункціональний NSI. Кожне NSSI створюється над інфраструктурою, яка забезпечує віртуалізовані ресурси, які супроводжуються відповідною організацією та управлінням, означає формування так званих шифер, як показано на рисунку. Кожен ресурсний шифер абстрагує певний тип ресурсу та забезпечує засіб LCM та управління по відношенню до NSSI.

2.1.3 Multi-domain Slice Management

Наскрізна NS розгортається в декількох мережах, що розтягуються на RAN, транспортні та базові сегменти мережі; що належать до одного або

різних адміністративних доменів. Процес створення багатодоменого NSI використовує переваги рекурсивної віртуалізації, як описано в. Рекурсивна віртуалізація дозволяє ієрархічну абстракцію мережі, де сланці пропонують логічний перегляд ресурсів NSI, а NSI, в свою чергу, NSI. Кожен послідовно найвищий рівень забезпечує більшу абстракцію в більш широкому діапазоні, приховуючи внутрішні елементи шару, одночасно дозволяючи використовувати загальний ресурс. Така парадигма може полегшити склад NS через різні адміністративні кордони, ефективно та гнучко поєднуючи різні типи ресурсів. Основна проблема полягає в розгортанні та керуванні роботою, оскільки задіяні домени можуть бути не лише географічно відокремленими центрами обробки даних, пов'язаними між собою через інфраструктуру глобальної мережі (WAN), але можуть належати до різних адміністративних доменів.

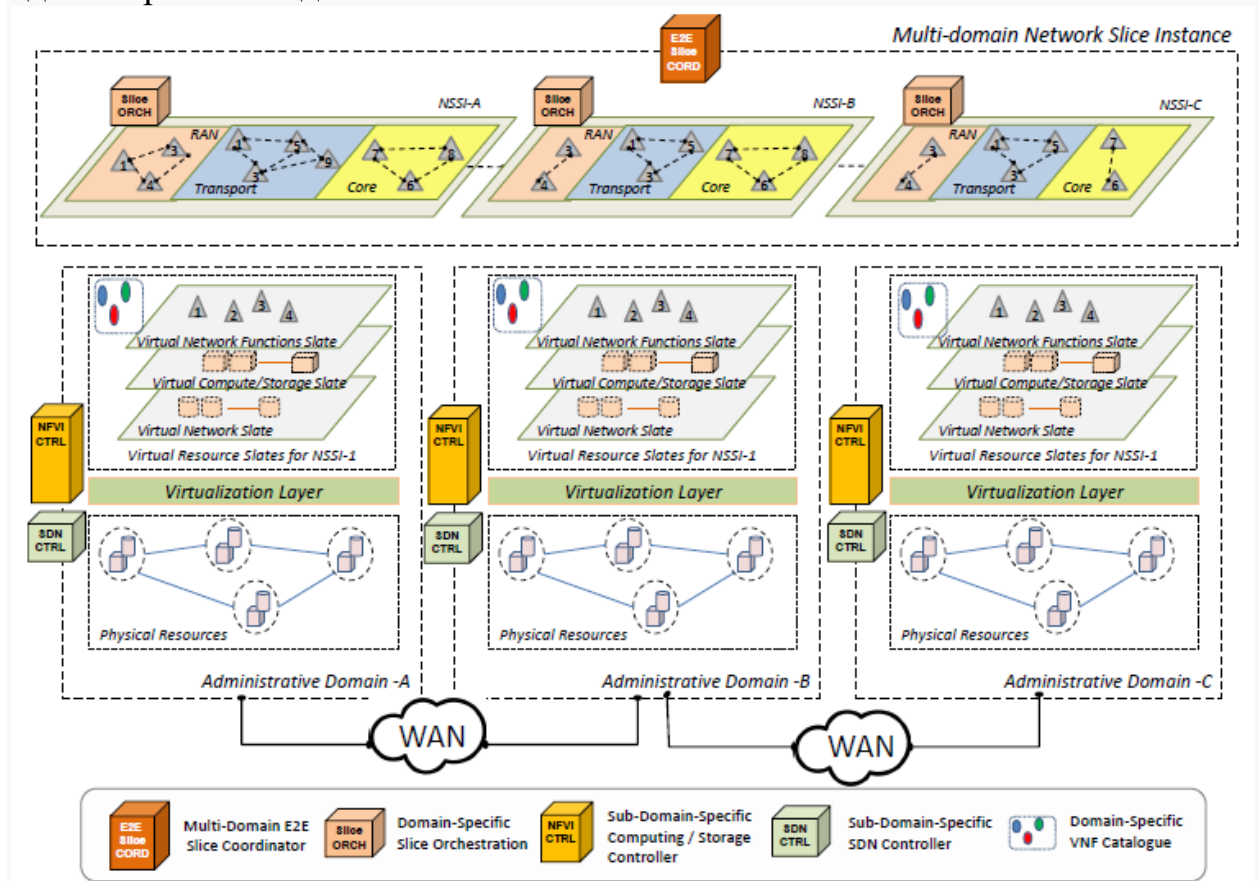


Рис.2.3.Множинний зріз мережі в кількох адміністративних доменах

На рис. 2.3 зображено повністю функціональну наскрізну NS у трьох адміністративних доменах А, В і С, що ілюструє відповідну фізичну

інфраструктуру. Щоб зрозуміти притаманну складність, ми перелічимо нижче деякі основні процеси, що беруть участь, коли запит на зріз надходить від третьої сторони:

- 1) Порівняння вимог до послуги з вимогами до можливостей.
- 2) Переклад вимог до можливостей у:
 - a) Вимоги до ресурсів НСІ з точки зору обчислювальних, сховищних та мережевих ресурсів.
 - b) Топологія та тип підключення NSI, політика, ізоляція та вимоги безпеки.
- 3) Визначення доменів інфраструктури з необхідними ресурсами, що може забезпечити наскрізні функціональні та експлуатаційні вимоги НСІ.
- 4) Примірник НСІ в кожному домені інфраструктури, а потім "зшивання" їх для створення об'єднаного НСІ.
- 5) Забезпечення операцій з управління координацією виконання в різних доменах для підтримки наскрізної цілісності служби NSI.

Такі процеси мають кілька архітектурних наслідків, що вимагають ефективних контролерів на різних рівнях шару. Як показано на рис.2.3, існує необхідність мати принаймні три рівні контролерів. Тобто два контролери субдоменів для організації ресурсів Інфраструктури віртуалізації мережевих функцій (NFVI) та управління мережею. Спеціальний контролер зрізів для організації та управління НСІ в кожному відповідному домені та всебічний наскрізний координатор зрізів для уніфікації управління окремими багатодоменими НСІ.

Запропонована архітектура мережевих фрагментів у кількох адміністративних та технологічних доменах проілюстрована на рис. 2.4. Архітектура враховує масштабованість з її основними компонентами та функціями, описаними нижче.

Запропонована архітектура вводить функціональну площину, відому як ServiceBroker, для обробки вхідних запитів на зрізи від вертикалей,

операторів мобільних віртуальних мереж (MVNO) та постачальників програм, з основними операціями, переліченими нижче:

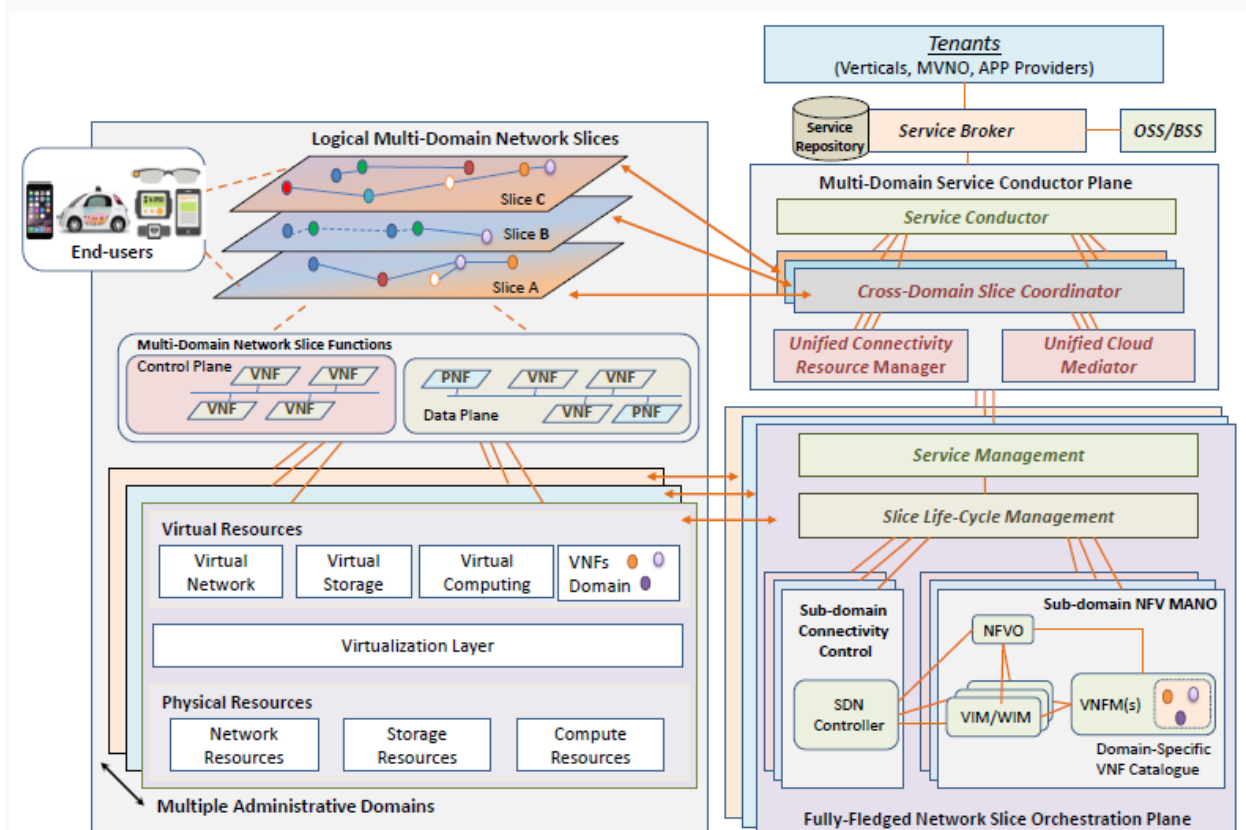


Рис.2.4.Багатодоменна архітектура нарізки

-контроль прийому та ведення переговорів з урахуванням аспектів обслуговування.

-управління взаємозв'язком з користувачем / власником зрізу, що забезпечує прямий інтерфейс орендаря з об'єднаною площиною багатодоменого провідника служби.

-управління доходами HSI, яке передбачає виставлення рахунків та нарахування плати власникам фрагментів.

-планування NSI, тобто час початку та завершення, пов'язаний зі складом фрагментів та виведенням з експлуатації.

Як правило, ServiceBroker збирає абстраговану інформацію про можливості служби щодо різних адміністративних доменів, створюючи глобальне сховище служби підтримки. Він також взаємодіє з операційною /

2.1.4 Архітектура радіо та EDGE

Загальна архітектура мережі радіодоступу (RAN), зображена на рис. 2.5, базується на базовій архітектурі, включаючи консенсус фази 1 5GPP та останні технічні характеристики випуску 3GPP щодо NG-RAN, що включає додавання рівня протоколу адаптації службових даних (SDAP) та інтерфейсу F1 з розділеним централізованим блоком - розподіленим блоком (CU-DU). Інноваційна архітектура здатна забезпечити покриття SmallCell (SC) для декількох операторів «як послуга», збагачена дворівневою архітектурою, що включає перший розподілений рівень для надання послуг із низькою затримкою та другий централізований рівень для забезпечення високих обчислювальних потужностей для обчислювальних мережевих додатків. Універсальність архітектури додатково покращується за допомогою високопродуктивних методів віртуалізації для ізоляції даних, зменшення затримок та ефективності використання ресурсів, а також шляхом організації легких віртуальних ресурсів, що забезпечує ефективне розміщення функцій віртуалізованої мережі (VNF) та реальну міграцію.

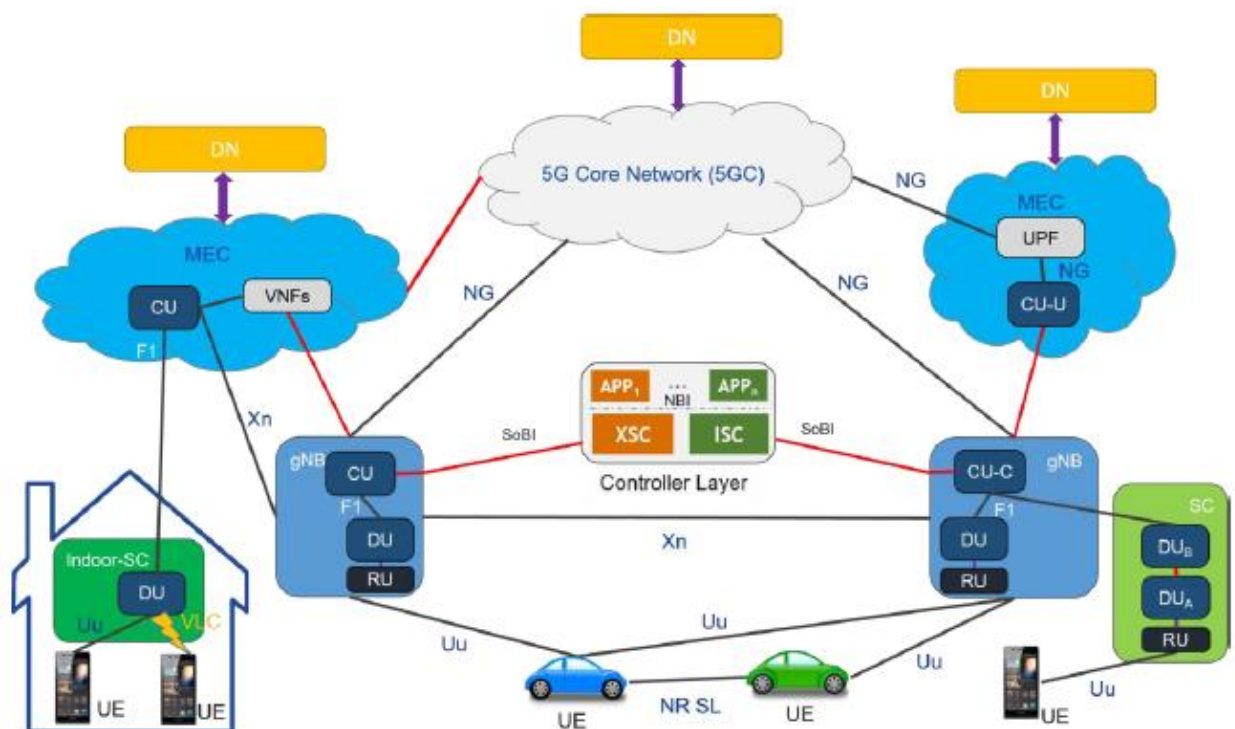


Рис. 2.5. Загальна архітектура RAN

Зокрема, запропоноване рішення передбачає віртуалізацію та розподіл невеликої пропускної спроможності, в той же час воно спрямоване на підтримку розширених служб хмарних хмар, збагачуючи мережеву інфраструктуру крайовою хмарою.

CU може бути додатково розділений на частину площини управління (CP), яка називається CU-C або CU-CP, та частину UserPlane (UP), що називається CU-U або CU-UP. Таке розділення дозволяє впроваджувати CU-C та CU-U в різних місцях, як показано на рис. 2.5. Іншим додатковим варіантом розділення є розділення нижнього шару, яке можна застосувати до DU. Варто зазначити, що ОП може працювати як невелика комірка. Архітектура RAN покращує базову архітектуру завдяки функціональним моделям, що впливають з інновацій 5GPP, як зазначено в наступних розділах. Одним з таких розширень є рівень контролера, який забезпечує програмованість RAN, з точки зору функцій управління RAN, як реалізація конкретної програми (APP). Додатки можуть працювати на інтерфейсі North-BoundInterface (NBI) через перехресний контролер зрізів (XSC) та Intra-SliceController (ISC), а зв'язок з RAN може підтримуватися через інтерфейс з обмеженням на південь (SoBI). Можна передбачити, що такі додатки забезпечують функцію повільного управління та можуть підтримувати функції управління RAN, такі як управління радіоресурсами (RRM). Для задоволення найвибагливіших випадків використання, включаючи транспортні програми, що мають найважливіше значення для безпеки, передбачається співпраця декількох посилянь; крім того, запроваджені місцеві наскрізні шляхи, щоб мінімізувати затримку між транспортними засобами та учасниками дорожнього руху, розташованих у відповідній близькості.

Використання технології віртуалізації мережевих функцій (NFV) дозволяє розгортати безліч дрібних комірок (наприклад, gNB для зв'язку з видимим світлом у будівлях) без витрат на передачу сигналів з 5GCore. Як зображено на рис. 2.5, декілька малих комірок можна розглядати як одну

маленьку комірку шляхом розгортання VNF у хмарі як форми обчислювальної обробки з декількома доступами (MEC). Іншими можливими сценаріями розгортання для малих осередків є або підключення всіх дрібних осередків безпосередньо до 5GCore з використанням інтерфейсу NG, що бачиться і управляється ядром 5G, або використання режиму подвійного підключення. Використання VNF значно зменшує передачу сигналів порівняно з іншими можливими сценаріями розгортання.

2.1.5 Архітектура ядра і транспортної мережі

Архітектура ядра мережі.

Мережева архітектура, покращена для багатоадресної передачі та трансляції, показана на рис. 2.6. Архітектура представляє нові NF, а також нові функціональні можливості існуючих NF. Слід зазначити, що ще одна альтернатива була вивчена в .

UE розкладається на додаток, конвергентне проміжне програмне забезпечення, модем 5G 3GPP та модем, що не є 3GPP. У випадку прозорого багатоадресного транспорту багатоадресні PDU передаються від модемів до мережевого інтерфейсу, пропонованого операційною системою, звідки вони споживаються або безпосередньо додатком, або конвергентним проміжним програмним забезпеченням, наприклад клієнтська бібліотека HTTP, що реалізує HTTP через багатоадресний QUIC . У випадку служб "точка-багато точок", конвергентне проміжне програмне забезпечення є однорідною сутністю до функції керування Xcast (XCF) та функції користувача площини Xcast (XUF).

Функціональні можливості XCF, пов'язані з площиною управління інтерфейсом xMB, включають автентифікацію та авторизацію XCF для постачальника контенту і навпаки, створення, модифікацію та припинення служб та сеансів. XCF взаємодіє з іншими NF через інтерфейс, заснований на послугах, і через контрольну точку Nx з XUF.

XUF - це точка входу для вмісту від постачальника вмісту. Площина використання інтерфейсу xMB пропонує як витягування, так і натискання для проковтування вмісту. Функціональні можливості XUF включають, наприклад, надійну доставку даних за допомогою односпрямованого транспорту (наприклад, FLUTE) та виправлення помилок вперед на рівні програми (AL-FEC). XUF відправляє багатоадресні IP-пакети через тунель N3 на UPF.

UPF розширений для підтримки виявлення членства в групі багатоадресної передачі, наприклад Протокол управління Інтернет-групою (IGMPv4) або Відкриття слухачів багатоадресного зв'язку (MLD) та маршрутизація багатоадресної передачі (наприклад, незалежна від протоколу багатоадресна передача) на додаток до вже зазначених функціональних можливостей .

Функції управління сеансами SMF використовуються для розподілу ресурсів та налаштування системи для багатоадресної передачі або трансляції. Процедури управління сеансами запускаються або за повідомленням від UPF, і від UE, або від XCF .

Потрібно виконати кілька кроків NF та іншими об'єктами архітектури, щоб увімкнути багатоадресну передачу або трансляцію. Тут ми коротко опишемо процедуру, пов'язану з модифікацією сеансу PDU, яка забезпечує прозорий багатоадресний транспорт і приводить до конфігурації системи, як показано на рис. 2.6. На першому кроці UE передає повідомлення (наприклад, IGMPv4), щоб приєднатися до групи багатоадресної передачі. Прийом цього повідомлення викликає подію площини користувача на UPF, про яку повідомляється SMF. SMF шукає існуючий багатоадресний контекст для цієї групи або створює новий багатоадресний контекст, якщо подія запускається для першого UE, що приєднується до групи. Потім SMF ініціює процедуру оновлення сеансу PDU, під час якої RAN отримує інформацію про групу багатоадресної передачі та UE, що приєднується до неї. RAN зберігає інформацію про всі UE, що приєднуються до групи багатоадресної передачі.

RAN використовує інформацію для конфігурації RANUE. RAN також приймає рішення на основі цієї інформації щодо найбільш ефективної передачі, тобто набору одноадресних передач від однієї комірки до багатоточок (SC-PTM) та багатокамерних передач від точки до багатоточок (MC-PTM).

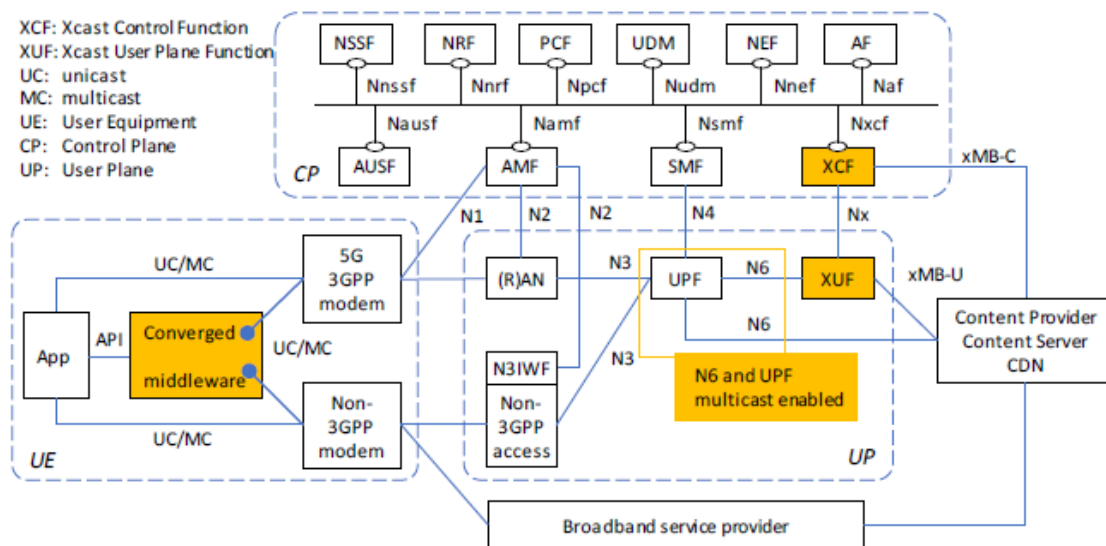


Рис. 2.6. Покращена архітектура системи для багатоадресної передачі та трансляції

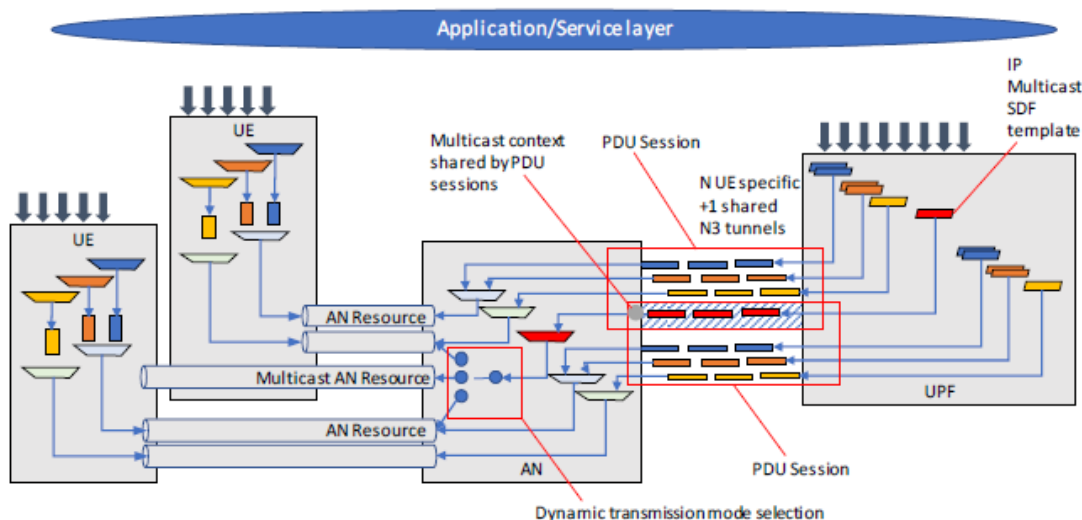


Рис. 2.7. Сесія PDU та контекст багатоадресної передачі в системах 5G

Інтегрована система аналізу даних враховує можливість аналізу даних на різних рівнях та вводить функції аналізу даних (DAF) у домен базової мережі (NW) (NWDAF), великі дані та управління оркестрація (великі дані/ MDAF),

рівень функцій програми (AFDAF) , UE / RAN-DAF та мережа передачі даних (DN-DAF). Кожен аналітичний модуль логічних даних реалізований у вигляді декількох екземплярів для різних випадків використання та цілей. Наприклад, модуль великих даних на рівні управління та оркестрації може бути реалізований як кілька екземплярів на домени (наприклад, аналіз даних RAN, аналіз даних VNF тощо) на різних рівнях (наприклад, міждоменний / внутрішній домен). Така структура дозволяє розробляти виділений аналітичний модуль даних на різних рівнях, а також дозволяє оптимізувати міжшаровий рівень. Різні модулі аналізу даних можуть бути взаємопов'язані з SBI. Нижче наведено перелік прикладів реалізації інтерфейсів в інтегрованій системі аналізу даних, показаних на рис.2.7.

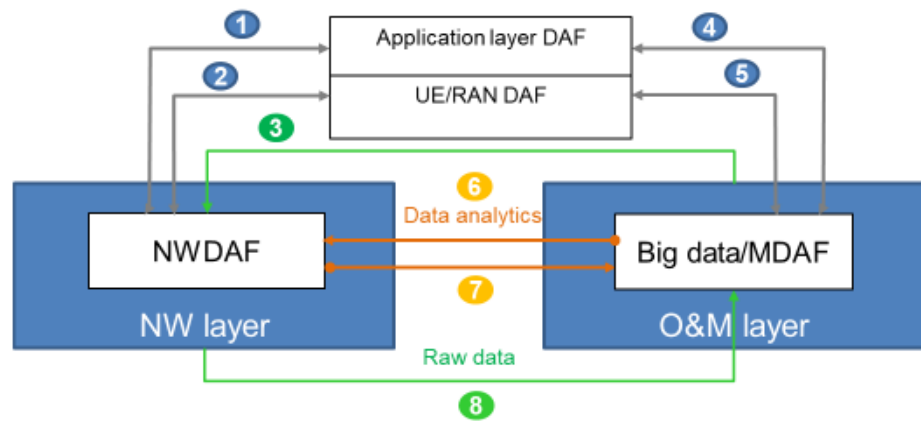


Рис. 2.8. Структура аналізу даних у 5G-MoNArch

Враховуючи жорсткі вимоги до латентності та надійності деяких віртуалізованих NF (наприклад, у домені RAN), проведення аналітики щодо розрахункового обчислювального завантаження / умов обчислювальних ресурсів є ключовим для виконання таких дій, як розвантаження навантаження обробки до інших блоків обробки хмари.

У режимі реального часу: аналітика може виконуватися в операціях в реальному часі (наприклад, передбачення каналу в масштабі часу). Однак це більш складне завдання, оскільки може знадобитися додаткова обробка, а накладні витрати можуть вплинути на продуктивність.

Майже реальний час / нереальний час: у цьому випадку аналітика виконується в часовому масштабі сек / хв / годину і може стосуватися певних типів прогнозування (наприклад, розподіл навантаження в географічній області). У Open-RAN (O-RAN) операції майже в реальному часі були визначені для охоплення таких операцій, як управління QoS, керування трафіком, управління мобільністю, які можуть бути напівдинамічними (наприклад, масштаб часу в 100 с).

На вимогу: Це може стосуватися як аналітики в режимі реального часу, так і не в режимі реального часу, і це той випадок, коли вертикаль або оператор вимагають увімкнення цієї функції як послуги для певної області чи часового вікна, щоб задовольнити вимоги зріз мережі.

Інфраструктура транспортної мережі.

Технології дротових мереж

Однією з головних проблем, яку повинна вирішити транспортна мережа, є забезпечення зв'язку між DU та CU, використовуючи загальноцифровані формати. Вони вже стандартизовані або перебувають на стадії стандартизації, такі як Спільний загальнодоступний радіоінтерфейс (CPRI) та розширений CPRI (eCPRI), застосовуючи в RAN більш гнучкі варіанти інтерфейсу, що дозволяють адаптувати функціональні розбивки між CU та DU з урахуванням вимог випадку, як можливості транспортної мережі. На додаток до оцифрованого рішення FH, значна увага приділяється аналоговим рішенням FH, які намагаються скористатися перевагами зменшеної складності RadiooverFiber (RoF), пропонуючи, з іншого боку, знижену гнучкість архітектури та підключення.

Змінні вимоги до послуг 5GRAN вимагають розробки нових рішень на транспортній мережі для взаємозв'язку RU з розподіленими (тип MEC) або централізованими обчислювальними ресурсами (Центри даних) для обробки функцій BB. Ці рішення повинні одночасно забезпечувати високий рівень гнучкості, ресурсної та енергетичної ефективності. Прийняття транспортних мереж високої пропускної здатності та гнучкості, які покладаються на

масштабовані та енергетичні, а також на економічно ефективні програмовані технології, є перспективним підходом до вирішення проблем, що виникають внаслідок поточних та майбутніх RAN.

У цьому контексті спільний розгляд питання щодо програмного забезпечення мережі та програмованості вдосконалених апаратних рішень (HW) дозволить динамічно розподіляти різноманітні завдання між централізованими та розподіленими елементами. Це дасть можливість фізично та віртуальним мережевим функціям належним чином поєднувати та розгортати поверх будь-якого програмованого обчислювального та / або мережевого елемента. Як приклад, програмовані NF можуть бути розміщені локально на мережеских вузлах (підходить для додатків із низькою затримкою), або на віддаленому сервері (без суворих обмежень затримки).

У наступному матеріалі представлені деякі найсучасніші транспортні технології, які зараз випробовуються на різних європейських тестових стендах 5G.

Програмований еластичний оптичний транспорт на основі каркаса

Для вирішення необхідних частих реконфігурацій мережі передові оптичні мережеві рішення застосовують дуже гнучкі та динамічно мінливі мережеві архітектури та технології, що безпосередньо вирішують сутність та характеристики послуг з точки зору типів даних, генерації потоків трафіку та вимог наскрізного зв'язку. Однак, крім гнучких архітектур та динамічно застосовуваних технологій, оптичні мережі повинні підтримувати функції програмованості, щоб відповідати дуже різноманітним та швидко мінливим вимогам до підключення до мережі 5G з високою пропускнуою здатністю. Ця програмованість використовує переваги активних та еластичних оптичних технологій, які можна програмувати та контролювати відповідно до вимог до рівня обслуговування. Хоча комерційно доступні рішення виконують оптичне перемикання з підтримкою деталізації перемикання довжини хвилі, дуже різноманітні вимоги до експлуатаційних послуг та послуг кінцевих споживачів вимагають нових підходів. Ці підходи могли б застосувати більш

динамічні та гнучкі рішення, щоб запропонувати більш високий рівень деталізації на рівні довжини хвилі, а також більшу еластичність з точки зору оптичного спектру.

Одним із таких прикладів активного оптичного транспорту є оптична мережа, розділена часом (TSON). Це оптичне мережеве рішення на основі кадру пропонує деталізацію перемикавання під довжину хвилі.

TSON забезпечує зв'язок між RU, DU та CU, і може забезпечити концепцію віртуальних BBU (vBBU) та полегшити ефективний обмін обчислювальними ресурсами.

TSON підтримує еластичне розподілення смуги пропускання на рівні часового кадру. Хоча спочатку TSON дозволяє обробляти кадри Ethernet, його конфігурація може підтримувати широкий спектр структур кадрів та комунікаційних протоколів, включаючи CPRI, eCPRI та Ініціативу архітектури відкритої базової станції (OBSAI), як власне, так і через їх пакетні версії. Для досягнення цього TSON покладається на загальну та гнучку структуру розподілу ресурсів, що приймає ієрархію з трьох рівнів деталізації ресурсів, включаючи з'єднання, кадри та часові зрізи (рис. 2.9). З'єднання відноситься до встановлення шляху світлової хвилі під довжиною хвилі між будь-якими двома кінцевими точками в домені TSON. Кожен кадр ділиться на часові зрізи як найменші одиниці мережевих ресурсів, тобто фактичні підламбда-ресурси. Довжина кадру та кількість часових зрізів усередині кадру визначають мінімальну деталізацію, досяжну мережею TSON. Фреймворк TSON пропонує дуже гнучку оптичну платформу, яка підтримує перемикавання довжин хвиль, довжину кадру від 64 нс до 25,6 мкс та змінну швидкість передачі даних від 30 Мбіт / с до декількох Гбіт / с, при 30 Мбіт / с крок.

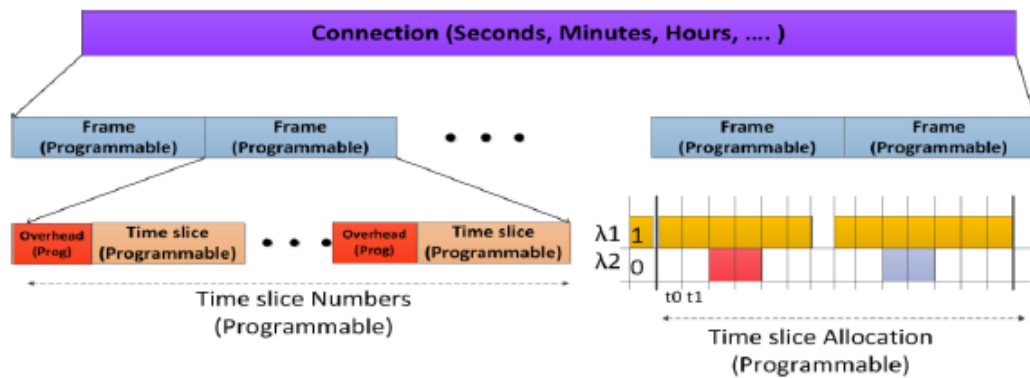


Рис.2.9.Структураз'єднання, фреймтарозрив

РішенняTSONвключаєдварізнітипивузлів, крайовітаосновнівузли, включаючиризнуфункціональністьтарівеньскладності. Крайові вузли TSON забезпечують інтерфейси між іншими технологічними доменами, включаючи RAN, пасивні оптичні мережі та домени MEC або центри обробки даних, на яких розміщені ресурси обчислень / зберігання, і навпаки. Типовий приклад наведено на рис. 2.10, де мультиплексування з пасивним поділом довжини хвилі (WDM) забезпечує гнучкі FH-з'єднання між RU на стороні антени та BBU в центральному офісі (CO).

Крайові вузли представляють гібридну підсистему, здатну обробляти безперервні (потoki вводу-виводу) та пакетні потоки (трафік Ethernet). Оптична смуга пропускання, призначена для різних служб, не є фіксованою, але її можна точно визначити на основі вимог кожної послуги. Основні вузли TSON не виконують ніякої обробки даних, але оптично перемикають трафік. Тому основний вузол TSON на базі FPGA керує швидкими оптичними перемикачами для налаштування шляху відповідно до запитів на обслуговування.

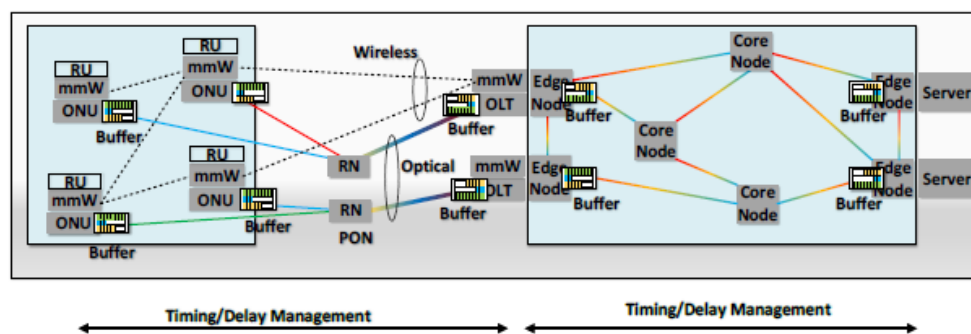


Рис. 2.10. TSON, що інтегрує RAN, PON та обчислювальні домени

TSON також надає можливість мультиплексування трафіку eCPRI та CPRI шляхом відповідного призначення відповідних ресурсів (довжини хвиль, часових інтервалів) та встановлення різних пріоритетів для різних потоків трафіку залежно від необхідного QoS. Приклад цього процесу показано на рис. 2.11, де два потоки eCPRI на основі Ethernet агрегуються TSON Edge 1 в один потік, а потім мультиплексуються разом із потоком CPRI, призначаючи різну довжину хвилі кожному з них.

Потім ці дві довжини хвилі подаються в селективний перемикач 1 довжини хвилі (WSS 1). Потім WSS 1 мультиплексує пакети eCPRI та CPRI через одне волокно та надсилає їх на WSS 2. WSS 2 приймає потоки висхідного потоку та демультимплексує їх у потоки пакетів eCPRI та CPRI на основі їх довжини хвилі. Вузол TSON Edge 2 приймає пакети з портів Ethernet та CPRI та передає їх окремо своїм клієнтам. У подальшому сценарії, навпаки проводиться операція.

TSON повністю підтримує SDN, а параметри вузлів TSON програмуються відповідним контролером. Крім того, TSON підтримує програмований контроль потоку трафіку (тобто VLAN, DestMAC, SrcMAC).

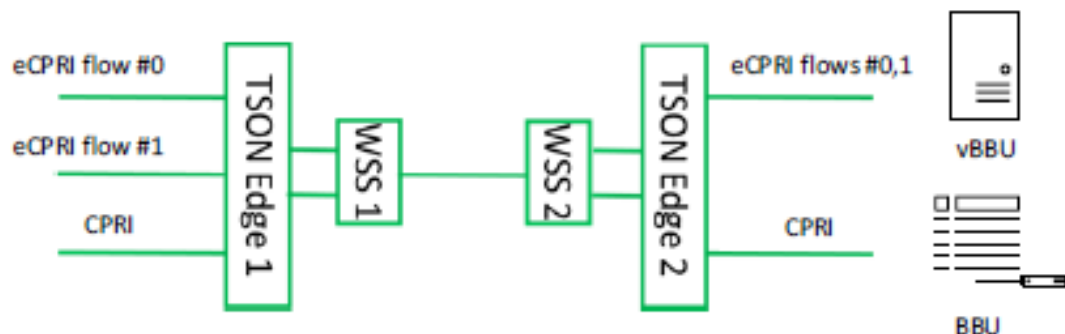


Рис.2.11. Мультиплексування eCPRI та CPRI над TSON

Ethernet-транспорт

Зниження загальних витрат та підвищення ефективності роботи представляють дві ключові цілі як SDN, так і оператора Ethernet. У транспортній мережі технологія «весь IP, весь Ethernet»

має на меті забезпечити основу,

на якій будуть будуватись

МНОїхні майбутні програмовані мережі, засновані на SDN і готові до зрізів.

Крім того, мости Ethernet спочатку були розроблені для забезпечення максимального трафіку без необхідності максимальної затримки через мережу. Через необхідність використання Ethernet для аудіо- та відеотрансляції в професійних студіях, існує технологія IEEE 802.1 Ethernet стандартизація механізмів, що забезпечують нульову втрату пакетних перевантажень, а також контроль затримки та варіації затримки пакетів (PDV). Нещодавно основними рушіями для подальшого розвитку стандартизації є промисловий контроль та автомобільне застосування, найновішим є мобільний FH.

Для транспортної мережі основними напрямками діяльності є Ethernet через багатопроTOCOLьну комутацію етикеток (EoMPLS), Ethernet через SONET / SDH, Ethernet через DWDM та Ethernet через оптичну транспортну мережу (OTN). Нещодавно підходи також зосереджуються на технологіях Flex-E та X-Ethernet для збільшення потужності та управління динамікою навантаження та забезпечення гарантій продуктивності.

Зокрема, кожен згаданий шар підтримує:

- Шар передачі даних: а) Логічний контроль зв'язку (LLC) для мультиплексування мережевих протоколів через один і той же MAC, підшар управління доступом до мультимедіа (MAC) для адресації та механізмів управління доступом до каналу та підрівню узгодження (RS), який обробляє локальну / віддалену помилку RHY повідомлення.

- Рівень RHY: а) PCS виконує автоматичне узгодження та кодування, б) підрівень PMA виконує кадрування PMA, синхронізацію / виявлення октету та скремблювання / дескремблювання, і с) Залежний від фізичного середовища підшар (PMD) - це трансивер, який залежить від фізичного середовища .

Адаптація швидкості здійснюється шляхом простою вставки / видалення відповідно до IEEE 802.3. Цей коефіцієнт трохи менший, ніж показник

клієнта Flex-E, щоб дозволити маркери вирівнювання на PNH групи Flex-E та вставити накладні витрати Flex-E у пару. Потім усі блоки 66b від кожного клієнта Flex-E поспідовно розподіляються в календар групи Flex-E, де виконується мультиплексування. Вступ до Flex-E та можливі випадки використання Flex-E описані Google у роботах [1]. У роботах автори представляють інтеграційний підхід управління та управління FlexEthernet через OTN.

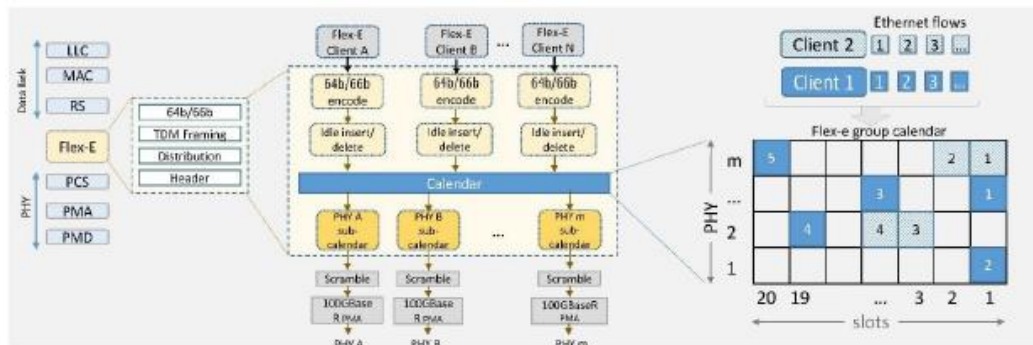


Рис.2.12.Шар Flex-E між Ethernet MAC та PCS. Додатковий розподільний / агрегований підшар FlexE Shim в PCS / PMD

Крім того, нещодавнобулизапропоновані механізми Ethernet з чутливою до часу мережею (TSN) для забезпечення низької затримки в Ethernet у поєднанні зі статистичним мультиплексуванням. TSN - це набір підстандартів IEEE 802 Ethernet, які визначаються групою завдань IEEE TSN. Нові стандарти описують декілька механізмів для покращеної або навіть гарантованої доставки трафіку Ethernet у режимі реального часу.

Бездротовий.

Неоднорідність мережі в 5G передбачає інтеграцію вдосконалених бездротових систем, що дозволяють з'єднувати велику кількість кінцевих пристроїв. Мережа бездротового транспорту та доступу буде базуватися на технологіях Sub-6, технологіях mmWave та масивних методах MIMO, використовуючи набагато більшу кількість антен у gNB для поліпшення швидкості передачі даних, надійності та енергоефективності. Вони будуть співіснувати із застарілими (2-3G), Long Term Evolution LTE (4G) та

технологіями Wi-Fi, щоб забезпечити більш широке покриття та доступність, більшу щільність мережі та підвищену мобільність.

З точки зору бездротових технологій, транспортна мережа наразі розглядає щільний шар дрібних комірок, що працюють в діапазоні частот 100 МГц - 100 ГГц. Безпроблемна інтеграція технології mmWaveBN з технологією Sub-6 Non-Line-of-Sight (NLoS) загальновизнана як технологія, що забезпечує ідеальне поєднання потужності та покриття операторами, що розгортають бездротову мережу, особливо в складних міських дислокаціях .

Міліметрова хвиля (mmWave)

Міліметрова хвиля представляє себе як ключова технологія для вирішення підвищених швидкостей передачі даних, необхідних для обслуговування щільних міських районів. Крім того, поєднання високої швидкості передачі даних і діапазону з високою роздільною здатністю є однією з ключових особливостей, яку ця технологія може розблокувати найближчим часом . Ця функція може бути корисною для нових послуг, таких як програми, що мають важливе значення для безпеки, доповнена реальність, допомога в житті тощо.

В даний час бездротові ВН-канали MmWave встановлюються за допомогою багатогігабітних ВН-технологій на основі WiGig (IEEE 802.11ad), що працюють у V-діапазоні на частоті 60 ГГц. Такі рішення використовують електронне керування променем для встановлення різних конфігурацій топології. Очікується, що ці вузли підтримують методи відстеження променя і багатовихідного багатовихідного виходу (MIMO), а також розширені програмованими мережевими процесорами, що дозволяють легко конфігурувати / модифікувати або контролювати функції мережі за допомогою контролера SDN.

Наразі ці технології співіснують із технологіями Sub-6 GHz, щоб отримати користь від їх спільного розташування , оскільки рішення Sub-6 дозволяють працювати NLoS і можуть доповнювати вузли mmWave у ситуаціях, коли вузли mmWave стикаються з умовами NLoS. Технології Sub-

6 будуть забезпечені можливостями самопереробки. Розміщення цих технологій також може сприяти локалізації додаткових станцій. Як приклад, вимірювання кута до 6 ГГц можуть підтримувати механізми наведення пучка mmWave з використанням ширини променя настільки, наскільки останні можуть дозволити точну локалізацію статичних та рухомих вузлів.

Ключовою особливістю рішень mmWave є поєднання оптимізованих апаратних прискорювачів з програмованою паралельною обробкою. А саме, будучи програмно визначеними як MAC, так і PHY, що дозволяє досліджувати та постійно пристосовувати продуктивність нових бездротових алгоритмів mmWave в контексті передових дослідницьких платформ.

Ще однією специфічною роботою в mmWaves є поєднання мультиантенних (MIMO) методів на цих частотах. По суті, архітектура mmWaveLine-of-Sight (LoS) MIMO особливо цікава для бездротових ВН-програм, де потрібно підтримувати дуже високу швидкість передачі даних. Кількість паралельних потоків даних, що підтримуються цими системами, визначається двома факторами - розташуванням антенної решітки та продуктом діапазону передачі довжини хвилі. Це означає, що відстань між елементами антени співвідноситься з досяжним діапазоном зв'язку (тобто розділенням між передавачем і приймачем). Іншими словами, коли потрібні додаткові потоки, потрібно або збільшити розмір масиву, або зменшити довжину хвилі або діапазон.

Максимально досяжні швидкості для різних конфігурацій антен показані на рис. 2.13. Ці результати представляють теоретичну верхню межу досяжної норми. Для практичних систем цей показник нижчий і обмежений ВЧ-порушеннями. Наприклад, враховуючи стандарт IEEE 802.11ad, з розрахунковим SNR 25,95 дБ, може підтримуватися найвища схема модуляції та кодування (MCS12), швидкість передачі даних 4,62 Гбіт / с. Це означає, що сукупні швидкості передачі даних для системи, представленої з індексами 1, 2, 3, 4, 5 та 6, становитимуть відповідно 18.48, 27.72, 36.96, 41.58, 46.20 та 73.92 Гбіт / с.

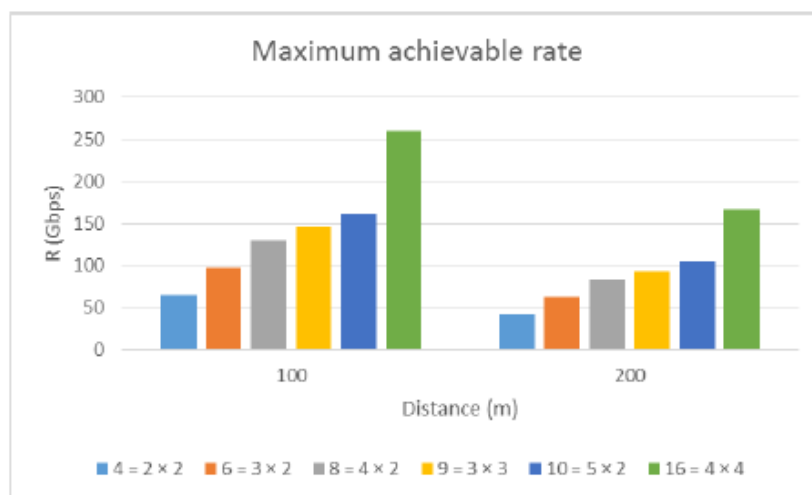


Рис.2.13.МаксимальнодосяжнашвидкістьсистемиLoSMIMO 60 ГГцдлярізнихконфігураційантеннавідстані 100 та 200 метрів

2.2 Фактори, які впливають на планування мереж 5G

На відміну від LTE/3G, на планування радіомережі 5G може вплинути цілий ряд факторів, обумовлених принциповою особливістю цієї технології. Ось ці фактори :

1. Новий метод множинного доступу (OFDMA, SC-FDMA).
2. Наявність відмінностей в організації мережі та оцінці її пропускної здатності при різних видах дуплексу FDD і TDD.
3. Адаптація схем модуляції та кодування. Описані раніше процедури адаптації в радіоканалах LTE в основному базуються на інформації про якість каналуCQI, переданої в спеціальних каналах зворотного зв'язку. Індикатор CQI (Channel quality indicator) є мірою стану каналу для всіх користувачів мережі та є дискретною величиною (зазвичай з 30-ма рівнями) для оцінки відношення носіння сигнал/шум SNR в приймальну. На рис. 2.14 показаний приклад моделі відображення SNR в дискретні значення CQI.

Отже, індикатор CQI використовується в якості вхідного параметра для планувальника базової станції eNode B при адаптивному виборі схеми модуляції й кодування, АМСплануванні та призначенні радіоресурса. Тому від точності CQI залежить ефективність використання цього

ресурсу. Перетворення CQIу радіоінтерфейсу пов'язане з деякими неточностями, зумовленими квантуванням, тимчасовими затримками, усередненням SNR та ін.

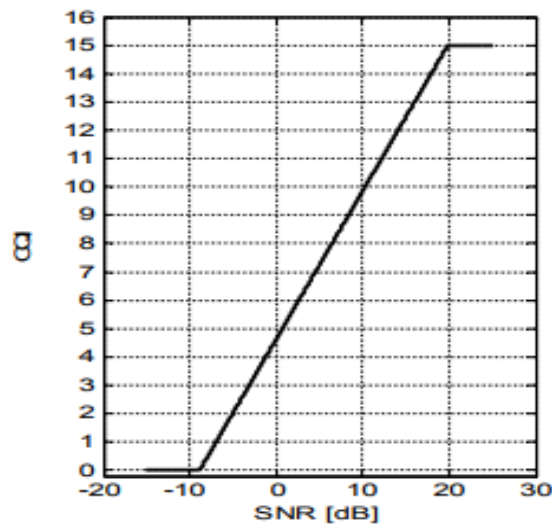


Рис.2.14. Модель відображення SNR у значенні CQI

Це визиває необхідність коригування CQI в eNode B. Найпростіший спосіб такого коригування – перерахунок значень CQI за допомогою деякого обмежувального параметра LAM (Link Adaptation Margin).

$$CQI_0 = CQI - LAM \quad (2.1)$$

Параметр LAM вказує величину, на яку зменшується поточне значення CQI перед використанням його в алгоритмі адаптації. Якщо значення LAM позитивне, то CQI_0 буде зменшено, і це викличе призначення ресурсів каналу для низької швидкості передачі даних, і навпаки. Це в кінцевому підсумку впливає на такі плановані параметри радіомережі, як швидкість та якість передачі даних. На рис 2.14 показана залежність максимальної швидкості передачі даних для одного користувача від відношення сигнал / шум при AMC і повторних передачах HARQ з адаптивним значеннями індикатора CQI.

4. Маштабування ширини радіоканалу, тобто можливість планувати радіоканали різної стандартизованої ширини (1,4 МГц, 3МГц, 5 МГц, 10МГц, 15 МГц, і 20 МГц). При плануванні цих каналів слід виходити з того, що ефективність LTE в порівнянні з UMTS/HSPA досягається при ширині

каналу не менше 10 МГц. Крім того, стандартом встановлено, що в деяких ідентифікованих смугах радіочастот плануватися можуть не всі з перерахованих каналів. Для кожного значення швидкості передачі даних або пропускної здатності осередку існує оптимальна ширина каналу, при якій зона радіопокриття є максимальною.

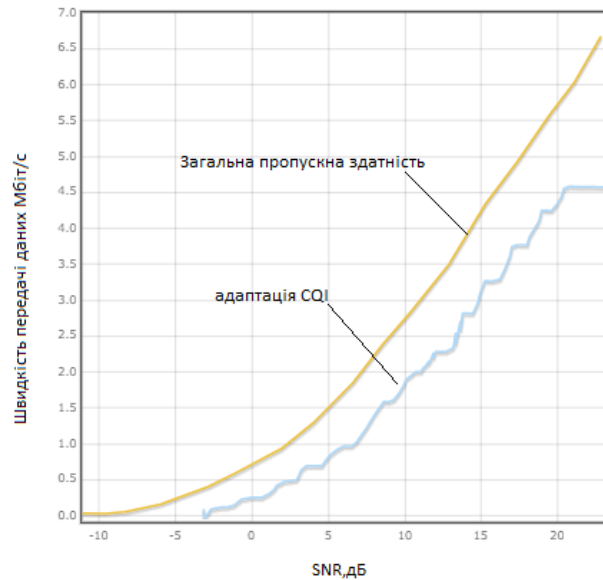


Рис. 2.15. Залежність швидкості передачі даних для одного користувача від SNR при AMC/HARQ з адаптивним значенням CQI



Рис. 2.16. Агрегування радіочастот спектра для LTE та HSPA в стандартах 3GPP

5. Використання агрегованого спектра за рахунок його комбінації (об'єднання) в різних смугах частот (рис 2.16). Існує кілька варіантів і

сценаріїв такого агрегування. Приклади найбільш пріоритетних сценаріїв використання агрегованого спектра на даний момент показані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2.

Приклади найбільш пріоритетних сценаріїв використання агрегованого спектра

Агрегування суміжних несучих частот в загальній смузі	
FDD	UL/DL: 2*20МГц (Band 3 – 1800 МГц)
TDD	UL/DL: 50 МГц(Band 40 -2300 – 2400МГц)
Агрегування несуміжних несучих частот у різних смугах	
Район 1 (Європа, Африка)	UL/DL: 40 МГц; 20 МГц/суміжних (Band 7 – 2.6 ГГц) + 20МГц/суміжних (Band 20 -800 МГц)
	UL/DL: 40 МГц; 20 МГц/суміжних (Band 3 – 1800 МГц) + 20МГц/суміжних (Band 20 -800 МГц)
	UL/DL: 40 МГц; 20 МГц/суміжних (Band 7 – 2.6 ГГц) + 20МГц/суміжних (Band 3 -1800 МГц)
Район 2 (Америка)	UL/DL: 20 МГц; 10 МГц/суміжних (Band 5 – 850 МГц) + 10МГц/суміжних (Band 12 -700 ¹⁾ МГц)
	UL/DL: 10 МГц; 5 МГц/суміжних (Band 17 – 700 ²⁾ МГц) + 5МГц/суміжних (Band 4 -1,7/2,1 ГГц)
Район 3 (Азіатсько-Тихоокеанський регіон)	UL/DL: 20 МГц; 10 МГц/суміжних (Band 1 – 1,9/2,1 ГГц) + 10МГц/суміжних (Band 18/19 ³⁾)
	UL/DL: 40 МГц; 20 МГц/суміжних (Band 38 – 2.6 ГГц/TDD) + 20МГц/суміжних (Band 40 -2.3 ГГц/TDD)
Агрегування несуміжних несучих частот у загальній смузі	
FDD/TDD	немає
	1) – 698 -716 МГц / 728-746 МГц
	2) – 704 -716 МГц / 734-746 МГц
	3) – 815 -830 МГц / 860-875 МГц / 875890 МГц

6. Широке використання мульти-антенної технології МІМО. При

плануванні радіомереж з цією технологією необхідно враховувати кілька умов і особливостей її застосування. По-перше, ефективність алгоритмів MIMO вище в умовах інтенсивних перевідбиттів сигналу, яскраво виражених у міських умовах, ніж в умовах відкритої місцевості. По-друге, збільшення пропускної спроможності за рахунок передачі декількох потоків даних по просторовим каналах при MIMO найбільш відчутно поблизу від базової станції, де відношення сигнал/шум відносно велике, на краю осередку воно недостатньо. Крім цього, конфігурація передавальних антен на базової станції впливає на загальний рівень сигналу, що приймається за кількома просторовими каналами, а також на виграш від просторового мультиплексування при MIMO, тобто виграш в пропускній спроможності. Як правило, на практиці застосовуються дві таких конфігурації: антени з крос поляризацією (X-pol) та антени з вертикальною поляризацією (V-pol) і просторовим рознесенням (4λ і більше). Вплив їх на загальний рівень сигналу приблизно однаково з невеликою перевагою другої конфігурації в умовах прямої видимості й першої конфігурації за відсутності такої. Зміна загального рівня сигналу на різній відстані від базової станції при описі конфігурацій антен показано на рис.2.17.

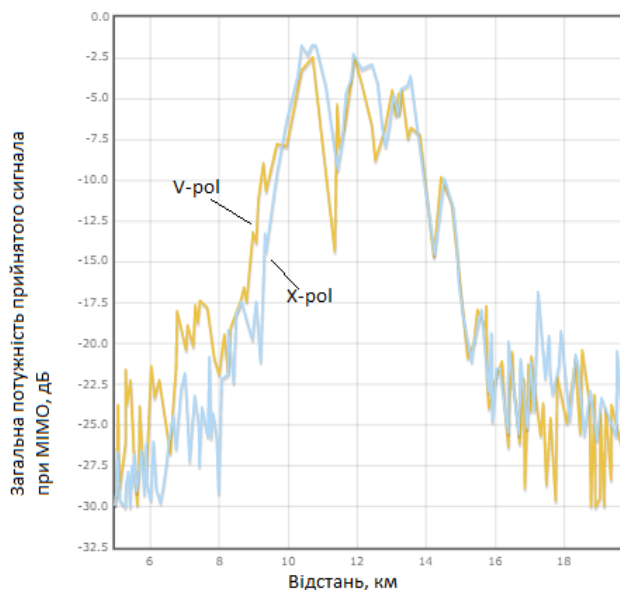


Рис.2.17. Загальна потужність прийнятого сигналу при різних типах антен MIMO

З точки зору виграшу від просторового мультиплексування антени з

крос-поляризацією мають великі переваги при прямої видимості. При відсутності прямої видимості помітної різниці між конфігураціями немає. Ці висновки необхідні враховувати при плануванні радіомереж LTE/5G.

Наведені результати показують, що перевагу при MIMO слід віддавати антені з крос-поляризацією.

Перші результати польового тестування MIMO в мережі 5G, наведені нижче. На рис. 2.18 показані експериментальні функції розподілу пропускної здатності Downlink у тестовому фрагменті мережі LTE в міських умовах при ширині каналу 10 МГц у діапазоні 2,6 ГГц.

Максимальне видалення від базової станції, на якому проводилися вимірювання на швидкості 5-30 км / год, становило 720 м.

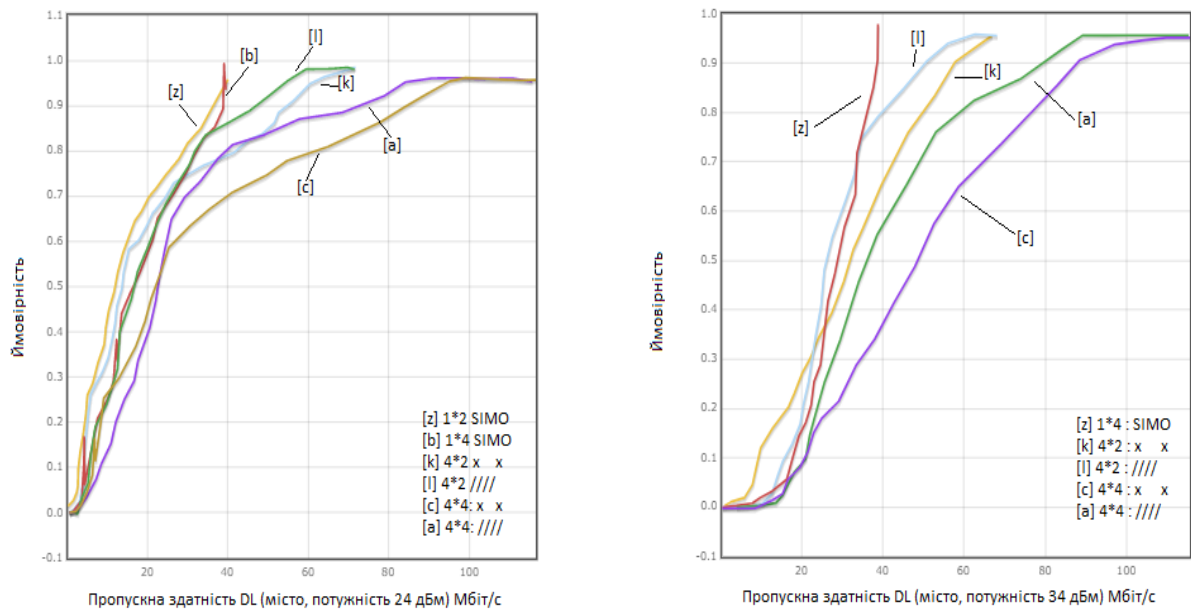


Рис.2.18. Функції розподілу пропускної здатності Downlink в умовах міста

З метою аналізу реальної ефективності MIMO ці функції були отримані при різних умовах: підвищена та знижена потужність передачі (34 дБм і 24 дБм), передача в режимах SIMO (1x2, 1x4) і MIMO (4x2, 4x4) при різних конфігураціях антен. Крім того, тестувалися випадки корельованого використання антен. На базовій станції застосовувалися 4 антени (панелі), кожна з яких складалася з чотирьох колонок Х-поляризованих елементів (+45, -45), рознесених по горизонталі на відстань $0,7\lambda$ (~8 см). Випадок

корельованих антен - коли використовувалися елементи з однаковою поляризацією в двох або чотирьох колонках однієї панелі з просторовим рознесенням між ними $0,7\lambda$. Це показано на рисунку як «4 * 4: ///» ([a] і «4 * 2: /// [1]).

Випадок некорельованих антен - коли використовувалися дві колонки X-Елементів з великим розносом між ними (25λ або 2,8 м). На рисунку це показано як «4 * 2: x x» ([k] або «4 * 4: x x» ([c]). В абонентському пристрої були використані дві антени з горизонтальною поляризацією та дві антени з вертикальною поляризацією, просторовий рознос між цими антенами складає 20 см ($\sim 1,7\lambda$).

На рис.2.18 показано порівняння функцій розподілу для тих же умов, але для умов передмістя з низькими будівлями.

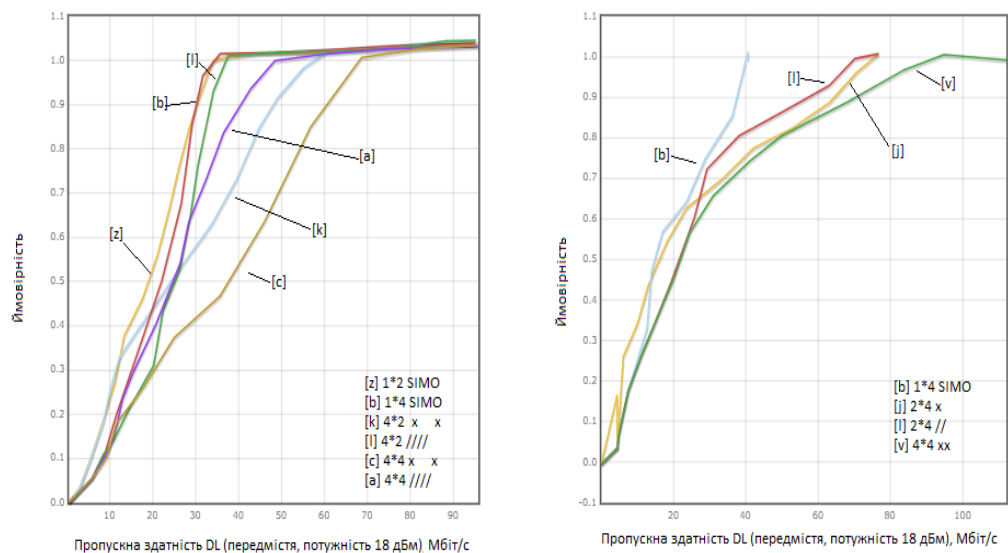


Рис.2.18. Порівняння функції розподілу пропускної здатності Downlink в умовах передмістя

Результати, наведені на рис. 2.17 і 2.18 свідчать про наступне. При MIMO велика пропускна здатність досягається в умовах міста, причому, різниця пропускної здатності між умовами міст а і передмістя становить при ймовірності 0,5 менше 10 Мбіт/с. Таке співвідношення пропускної спроможності в Downlink має місце при більш високому значення потужності передачі в місті (34дБм) і більш низькому значенні її в передмісті

(18дБм). З порівняння функцій розподілу на рис.2.17(зліва) і рис 2.18 (праворуч) можна зробити висновок, що при зниженій потужності передачі в місті спостерігаються невеликі відмінності між ефективністю різних конфігурацій передавальних антен (кількість і тип поляризації елементів).

З рис. 2.19 можна бачити, за рахунок чого відбувалося зростання пропускної здатності в Downlink в умовах передмістя при низькій потужності передачі (18дБм). Найбільша пропускна здатність (крива (a) на рис.2.19) досягнута при конфігурації 4x4 MIMO з чотирма некорельованими передавальними антенами і базової станції e-NB (дві суміжні колонки X-елементів) та чотирма приймальними антенами у вигляді попарно ортогональних елементів ($| - | -$) в абонентському пристрої UE. Найменш ефективним виявився сценарій з двома передавальними антенами, що мають крос-поляризацію (e-NB: x), і двома приймальними антенами з однаковою вертикальною поляризацією (UE: $||$). Цьому сценарію відповідає крива [d] на рис.2.19.

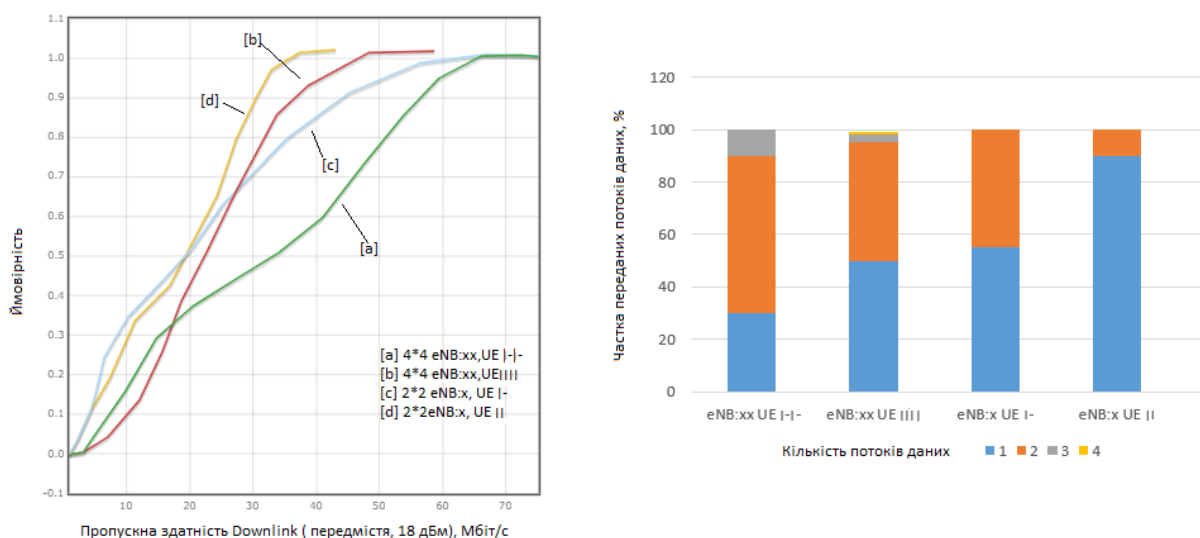


Рис. 2.19. Функції розподілу пропускної здатності Downlink (зліва) та кількість переданих паралельних потоків даних

В якості підсумкового результату за реальної ефективності MIMO на рис. 2.20 показані функції розподілу пропускної здатності в Downlink для умов міста в центрі тестової комірки (рисунок ліворуч) і на її кордоні (рисунок праворуч).

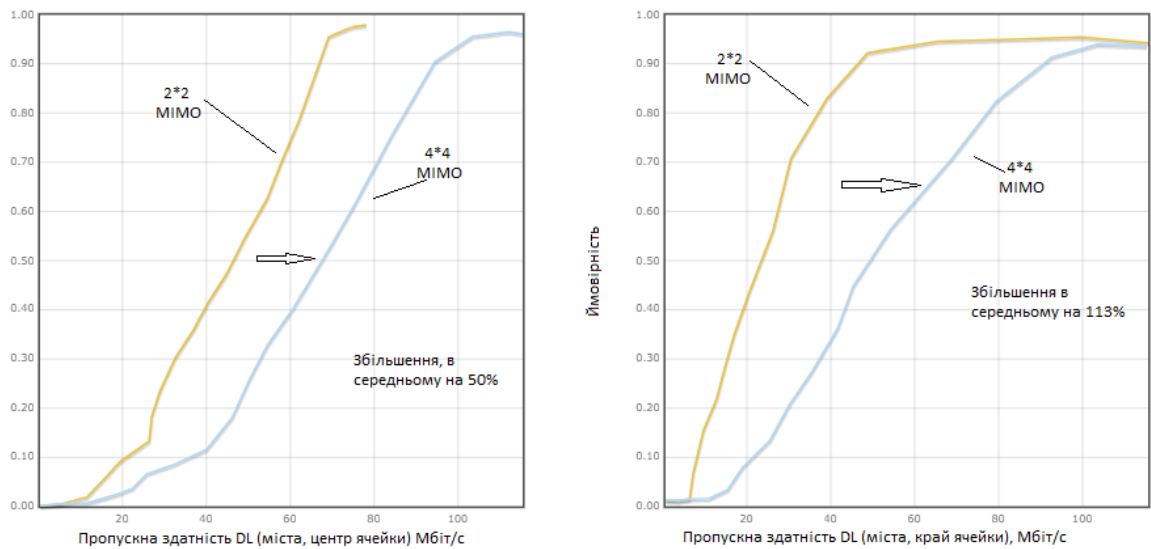


Рис. 2.20. Порівняння функцій розподілу пропускної здатності Downlink у центрі (зліва) та на краю (з права)

Ці результати показують, що ефективність технології MIMO в міських умовах залежить від конфігурації антен, особливо якщо розглядати центр осередку та її кордон. З наведених графіків видно, що більш складна конфігурація антен MIMO ефективніше на кордоні зони обслуговування осередку, ніж поблизу базової станції. Виграш по пропускній здатності в Downlink при переході від 2×2 MIMO до 4×4 MIMO становить у центрі осередку близько 50%, на краю осередку - більш, ніж у 2 рази.

7. Скоординована многоточечная передача CoMP.

8. Стандартизовані функції ретрансляції в радімережі.

9. Можливість самоконфігурування та самооптимізації радімережі SON (self organizing Networks). Велика завантаженість мереж (великі обсяги трафіку) в поєднанні з великою кількістю базових станцій, які використовують кілька смуг і діапазонів частот, ускладнюють завдання планування й оптимізації радімережі LTE. Функціональна можливість SON у LTE допомагає вирішити цю проблему, а також скоротити капітальні та експлуатаційні витрати, особливо на етапі будівництва та запуску LTE в експлуатацію. Додаткові можливості по самоорганізації мережі LTE визначені в стандартах 3GPP Rel'10. До цих можливостей відносяться:

балансування навантаження як всередині мережі LTE, так і між мережами GSM, UMTS і LTE; координація завадового впливу між осередками за рахунок не тільки скоординованого призначення частотного ресурсу в суміжних комірках, а й за рахунок часткового повторного використання радіочастот; автоматична поточна оптимізація зони покриття й пропускної здатності, яка в традиційних умовах досягається за рахунок проведення спеціальних тестових вимірювань; адаптивна конфігурація радіомережі, аж до автоматичного вимкнення окремих базових станцій у залежності від трафікового навантаження в мережі.

Ефективність використання наявного радіочастотного ресурсу можна підвищити при плануванні за рахунок раціонального вибору мережі 5G робочої ширини каналу. На підставі наведених у таблиці 2.3 даних можна запропонувати, що вибір стандартної ширини каналу 20 МГц дасть деякий надлишок смуги (резерв). Із-за її надмірності такий надлишок становить 20 МГц - 18,02 МГц \approx 2 МГц, де 18,02 МГц - значення реальної (ефективної) ширини каналу, і може бути сплановані за певних умов для додаткового каналу шириною 1,4 МГц без додаткових витрат на спектр.

Таблиця 2.3.

Залежність параметрів від ширини каналу

Стандартна ширина каналу, МГц	1,4	3	5	10	15	20
Розніс піднесучих частот	15кГц					
Кількість поднесучих частот	73	181	301	601	901	1201
Ефективна ширина каналу, МГц	1,1	2,72	4,52	9,02	13,52	18,02

При частотному плануванні, коли використовується агрегована смуга каналу, слід мати на увазі вимоги щодо необхідного розносу між суміжними

агрегуючими компонентами. У стандартах 3GPP встановлено правило по вибору такого розносу в LTE:

- значення розносу між центральними частотами суміжних агрегованих компонент має бути кратним 300 кГц для того, щоб забезпечити сумісність растра 100 кГц в LTE і одночасно зберегти ортогональність піднесучих частот з інтервалом між ними 15 кГц;
- значення такого розносу Δf_P має визначатися наступним виразом:

$$\Delta f_P = \left\lceil \frac{W_{Channel(1)} + W_{Channel(2)} - 0.1 * |W_{Channel(1)} - W_{Channel(2)}|}{0.6} \right\rceil * 0.3 \text{ [МГц]} \quad (2.5)$$

де $W_{Channel(1)}$, $W_{Channel(2)}$ - ширина смуги двох суміжних компонент агрегуючого спектра; $|x|$ - абсолютне значення x .

У виразі (2.5) показано, що для заданої швидкості передачі даних існує оптимальна смуга (ширина каналу) в Downlink і Uplink та її оптимальність визначається критерієм максимального розміру зони радіопокриття. Це обумовлено тим, що існує деякий компромісний стан, коли при фіксованій потужності базової станції зменшення смуги передачі, тобто кількості виділених ресурсних блоків RB, призводить до збільшення потужності передачі в ресурсному блоці (збільшення щільності потужності) і як результат, збільшується відношення сигнал / шум в RB. Це збільшення обумовлює підвищення (або збереження) швидкості передачі даних за рахунок адаптивного вибору модуляції більш високого порядку і скорочення кількості повторних передач при кращих умовах в радіоканалі. Таким чином, слід очікувати, що зменшення ширини каналу призводить однозначно до істотного і пропорційного зниження швидкості передачі даних в ньому. На рис. 2.21 показано, як залежать значення необхідної чутливості приймача від ширини каналу для різних фіксованих швидкостей передачі даних. Для наочності передбачається, що весь ресурс в Downlink виділяється одному користувачеві. Необхідна чутливість приймача є енергетичним параметром і побічно відображає розмір зони радіопокриття, оскільки, чим менше

значення чутливості, тим більші втрати на трасі поширення сигналу допустимі, тобто допустима велика дальність зв'язку.

З рисунку видно, що при малих швидкостях передачі даних (до 1 Мбіт / с) помітна істотна залежність необхідної чутливості приймача від ширини каналу в силу того, що значна надмірність смуги обумовлюється зростанням шумів в каналі. При одній і тій же смузі потрібна велика енергетика сигналу для передачі даних з великою швидкістю. В якості головного можна зробити висновок, що для кожної швидкості передачі даних існує оптимум ширини каналу, при якому потрібна мінімальна енергетика сигналу при максимально досяжному розмірі зони радіопокриття.

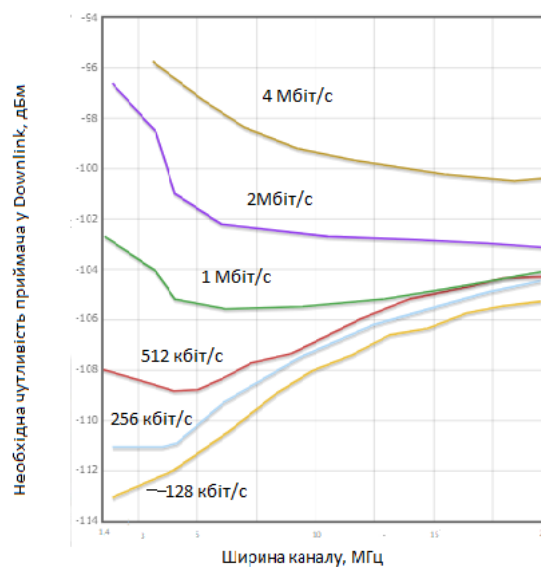


Рис. 2.21. Необхідна чутливість приймача DL для різних швидкостей передачі даних у різних по ширині каналах

Бачимо, що передача даних із сумарною швидкістю 4 Мбіт / с в каналі буде оптимальним при його ширині 10 МГц і більше, а для швидкості передачі даних 256 кбіт/с - при ширині каналу 1,4 МГц. Показання в прикладі швидкості передачі для кожної зі смуг не є граничними в LTE, вони взяті лише для того, щоб проілюструвати загальну тенденцію в поведінці радіоінтерфейсу. Цю тенденцію можна використовувати при плануванні радіомереж наступним чином. Нехай потрібно забезпечити в мережі деяке значення пропускної здатності R_{max} , яке можна досягти лише при певній

ширині каналу Δf_0 з огляду на те, що ми не маємо в своєму розпорядженні такої смуги, постараємося досягти R_{\max} в каналі з меншою шириною. Для прикладу візьмемо значення $R_{\max} = 4$ Мбіт / с, для якого оптимальна ширина $\Delta f_0 = 10$ МГц. Відповідно до графіка на рис 2.11, цього значення швидкості передачі даних можна досягти і в каналі при $\Delta f = 5$ МГц, але в меншій зоні радіопокриття, або в тій же зоні, але зі збільшенням потужності базової станції більш ніж на 2 дБ. З фізичної точки зору це очевидно, оскільки підвищити спектральну ефективність для збільшення швидкості передачі даних у більш вузькій смузі можна за рахунок більш високої енергетики в радіоканалі. Така енергетика могла б дозволити MIMO, модуляцію більш високого порядку і скоротити число повторних передач.

Слід зауважити, що використання описаного підходу до планування мережі вимагає додаткової оцінки верхньої межі, за межами якої збільшення енергетики в радіоканалі LTE вже не дасть зазначеного вище ефекту, оскільки відповідно з теоремою Шеннона надмірне збільшення енергетики призводить до насичення його пропускної здібності.

На відміну від радіоінтерфейсу UMTS ортогональність каналів LTE є більш суворою, а ступінь прояву внутрішньосистемних перешкод набагато нижче, у всякому разі, теоретично. Крім того, радіоінтерфейс LTE є більш стійким до ряду таких негативних впливів в радіоканалі, як:

- міжсимвольна інтерференція через багатопроменеве поширення сигналу практично усувається за рахунок введення циклічного префікса в тимчасову структуру OFDM-сигналу;
- міжчастотна інтерференція через доплерівській зсув між піднесучими частотами при високих швидкостях переміщення абонентського терміналу проявляється слабо через найнижче значення частотного розносу між ними (15 кГц при нормальному циклічному префіксі).

Спотворення форми сигналу через нелінійність в передавачі (вектор помилки магнітуди EVM) - частково знижено в передавачі абонентських пристроїв за рахунок застосувань спеціальної модуляції SC-OFMA.

Головним параметром Link Budget у радіоінтерфейсу LTE є відношення сигнал / шум у радіоканалі. Для розрахунків бюджету радіолінії це відношення задають для одного ресурсного блоку. При цьому основними є зовнішні внутрісистемні перешкоди від сусідніх сот. В якості таких перешкод в Downlink розглядають сумарні перешкоди: зовнішні - від суміжної смуги частот або суміжного каналу I_{ext} ., і внутрішні-від суміжних сот I_{inter} ., як показано на рис. 2.22.

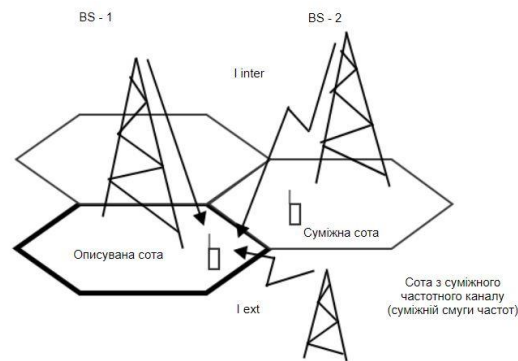


Рис.2.22.Джерело перешкод в радімережі LTE

Отже, відношення сигнал /шум на вході приймача k-го абонентського пристрою UE, що обслуговується j-й базою станціїBS, можна виразити таким чином

$$\left(\frac{P_c}{I}\right)_{RB} = \frac{P_c(j,k)}{I(j,k)} \quad (2.6)$$

- $P_c(j,k) = P^{RB} / Pathloss (BS_j, UE_{jk})$ – потужність корисного сигналу від j-ї BS на вході приймача k-го UE;

- P^{RB} – потужність передачі БС в одному ресурсному блоці RB;

- $Pathloss(BS_j, UE_{jk})$ – втрати по трасі розподілу сигналу між j-й BС та k-м UE.

Сумарні завади, включаючи потужність внутрішнього шуму приймача P_N , можна виразити :

$$I(j,k) = I_{inter}(j,k) + I_{ext}(j,k) + P_N, \quad (2.7)$$

$$I_{inter}(j,k) = \sum_{l=1, l \neq j}^{N_{cell}} P_l^{BN} / Pathloss(BS_j, UE_{jk}) \quad (2.8)$$

$$- I_{ext}(j,k) = \sum_m^{N_{ext_cell}} iRSS_{unwanted}(BS_m, UE_{jk}) * iRSS_{block}(BS_m, UE_{jk}) -$$

завади від суміжних каналів, які є продуктом внеполосних випромінень $iRSS_{unwanted}$ та завад блокування $iRSS_{block}$;

- $iRSS_{unwanted}(BS_m, UE_{jk}) = iRSS_{unwanted}$ (за межами ресурсних блоків k-го UE);

$$- iRSS_{block}(BS_m, UE_{jk}) = iRSS_{block}(\text{за межами полоси систем}) * \frac{N}{M};$$

- N_{cell} - кількість суміжних завадових сот у загальному частотному каналі;

- N_{ext_cell} - кількість завадових сот у суміжних частотних каналах;

- N- кількість прийнятих RB (кількість піднесучих частот);

- M-максимальна кількість RB, яка призначається в базовій станції.

Аналогічним чином задається відношення сигнал / шум у бюджеті радіолінії Uplink з тією лише різницею, що у вихідному каналах потрібно враховувати регулювання потужності випромінювання абонентським пристроєм.

Характеризуючи такий параметр, як відношення сигнал / шум, слід зробити кілька зауважень .

По-перше, в радімережі основний вплив на абонентський пристрій можуть надавати перешкоди від сусідніх сот на краю осередку. Рівень цього впливу буде залежати від активності випромінювання в цих сотах. З цієї причини відношення сигнал / шум в link Budget LTE має відображати цю завантаженість. Наведено аналітичний вираз для відношення сигнал / шум SINR, в яке входить коефіцієнт завантаження в сусідніх сотах η_{DL} .

$$SINR = \frac{1}{\frac{\eta}{SIR_{min}} + \frac{P_N + P_I(d)}{P_{BS}^3}} \quad (2.9)$$

де $SIR_{min} = P_c / I_{max}$ - відношення потужностей корисного сигналу P_c і максимальних перешкод від сусідніх сот на краю осередку I_{max} ;

- P_N - потужність шуму приймача;

- $P_{BS}^{\text{э}}$ - ЕИИМ базової станції у власному осередку;

- $P_l(d)$ - втрати при розповсюдженні сигналу на відстань d , що враховують запас на повільні замирання.

Наведений вираз описує компроміс між трьома параметрами планування мережі η_{DL} : розміром осередку d , середнім завантаженням мережі, пропускною спроможністю на краю осередку, вираженої у формі відносини SINR. На рис. 2.23 показана залежність пропускної здатності на краю осередку в мережі LTE від її розміру при різному завантаженні в сусідніх сотах (коефіцієнт η_{DL}) і ширині каналу 10 МГц.

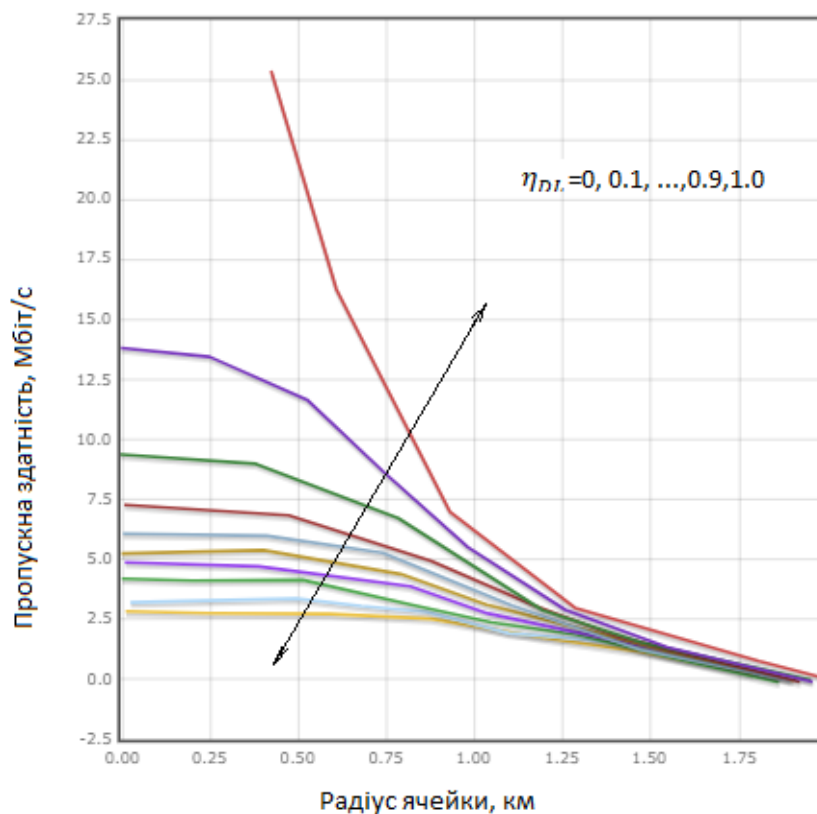


Рис. 2.23. Пропускна здатність на краю стільника

Як видно з рисунка, пропускна здатність на краю осередку при невеликих її розмірах значно залежить від завантаження сусідніх сот. При високому завантаженні мережі рівень перешкод різко зростає з огляду на те, що весь частотно-часовий ресурс цих сот стає зайнятим, і його скоординований розподіл стає неефективним і навіть неможливим.

По-друге, для розрахунків при плануванні радіомережі можна

використовувати вже наявні експериментальні дані за рівнями SINR необхідні для досягнення конкретних значень спектральної ефективності в мережі. На рис. 2.24 наведено приклад експериментальних залежностей спектральної ефективності від відносини SINR.

По-третє, у ході проведених досліджень емпіричним шляхом були отримані поправочні коефіцієнти, що дозволяють при розрахунках проводити корекцію оцінок каналу LTE (Channel Estimation Correction Factors). Ці коефіцієнти можуть бути використані при розрахунках пропускної спроможності або спектральної ефективності в реальних каналах (при корекції задаються ідеальні умови). Значення емпіричних коефіцієнтів корекції наведені в таблиці 2.4.

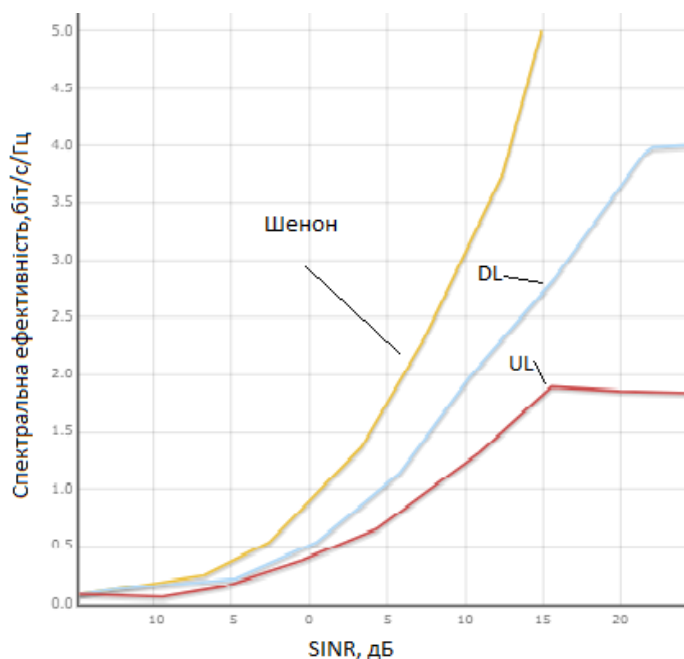


Рис.2.24.Залежність спектральної ефективності LTE відSINR

Таблица 2.4.

Значення емпіричних коефіцієнтів корекції

Радіомережа	Downlink		Uplink	
	Середина ячейки	Край ячейки	Середина ячейки	Край ячейки
LTEFDD	0.97	0.95	0.938	0.836
LTE TDD	0.95	0.93	0.964	0.909
WiMAX	0.94	0.93	0.938	0.836

І нарешті, при плануванні радіомереж LTE/5G необхідно брати до уваги наявну кореляцію втрат у власних і суміжних осередках мережі.

Висновки

В даному розділі були виявлені особливості технології, які можуть надати явний вплив на планування мереж, а також були описані очікувані особливості самого процесу планування. Аналіз показав, що на відміну від LTE, на планування радіомережі 5G може вплинути цілий ряд факторів, обумовлених принциповою особливістю цієї технології. Однією з основних складових частотного планування, яка і визначає головну його особливість, є раціональність розподілу наявного радіочастотного ресурсу в радіомережі, тобто способи розподілу цього ресурсу між осередками мережі, при яких взаємні перешкоди будуть мінімальними. Особливо це важливо для ефективного використання доступного радіочастотного ресурсу та досягнення максимальної пропускної спроможності в планованій мережі.

РОЗДІЛ 3

ПЛАНУВАННЯ МОБІЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ЗВ'ЯЗКУ ТА ОЦІНКА ЇЇ ХАРАКТЕРИСТИК

3.1 Дослідження характеристик мережі, що проектується

Щоб краще зрозуміти вплив апаратних порушень на форми сигналів-кандидатів (CP-OFDM, DFTs-OFDM, W / P-OFDM, UF-OFDM, FBMC-OQAM), їх ефективність повинна бути належним чином оцінена за наявності порушень. Для цього дослідження оцінки сигналів на рівні посилення виконуються за допомогою програмного забезпечення SystemVue.

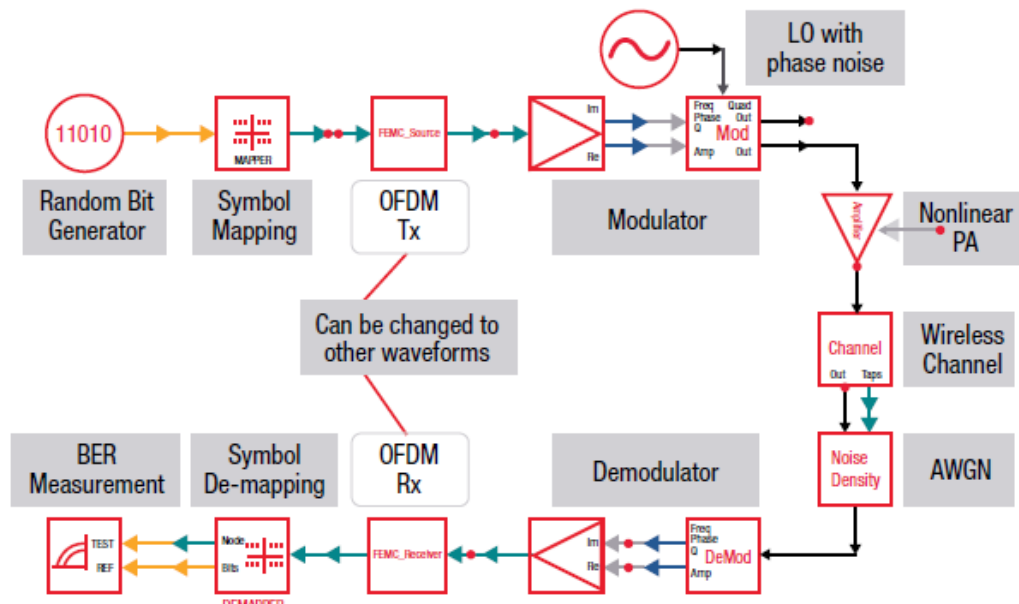


Рис. 3.1. Приклад ланцюга моделювання OFDM у проектуванні системи PathWave (SystemVue)

Рисунок 3.1 ілюструє наскрізний ланцюжок моделювання для сигналу OFDM, який складається з основних компонентів обробки сигналів. Для справедливого порівняння між різними формами сигналів використовується однаковий ланцюжок еталонного моделювання для кожної оцінки продуктивності. Різні генератори та приймачі джерела сигналу підключаються до еталонного ланцюга моделювання за загальних припущень моделювання

(табл.3.1). Для цих оцінок була використана розсіяна пілотна оцінка каналу, яка також компенсує CPE.

Таблиця 3.1

Короткий зміст основних параметрів моделювання

Parameters	Settings
Carrier frequency	28 GHz
Sampling frequency	122.88 MHz
FFT size	2048
Subcarrier spacing	60 kHz
Number of active subcarriers	1200
Signal power	0.01 W
Modulation and coding scheme	16 QAM
Antenna configuration	SISO
Channel model	AWGN
Symbols per subframe	7 (1 preamble + 6 data symbols)
Pilot design	Every 8 subcarriers, Zadoff-Chu
Hardware impairments	"low mode" phase noise & nonlinear PA

На рис. 3.2 та 3.3 зображено отримані коефіцієнти помилок у бітах (BER) та продуктивність EVM сигналів при різних апаратних порушеннях. Варто звернути увагу, що показники EVM та BER розглянутих сигналів лише незначно знижуються за наявності фазового шуму. Взагалі кажучи, форми сигналів MC чутливі до фазового шуму. Однак завдяки компенсації фазового шуму та достатньо великому відстані піднесучих ці форми сигналів стійкі до фазового шуму. У цьому випадку оцінка розсіяного пілотного каналу компенсує CPE. Коли в систему включається нелінійність у PA, ефективність BER та EVM погіршуються в порівнянні з випадком з ідеальною лінійною PA.

Цікаво також зазначити, що між різними формами сигналів кандидатів немає істотної різниці у показниках BER та EVM.

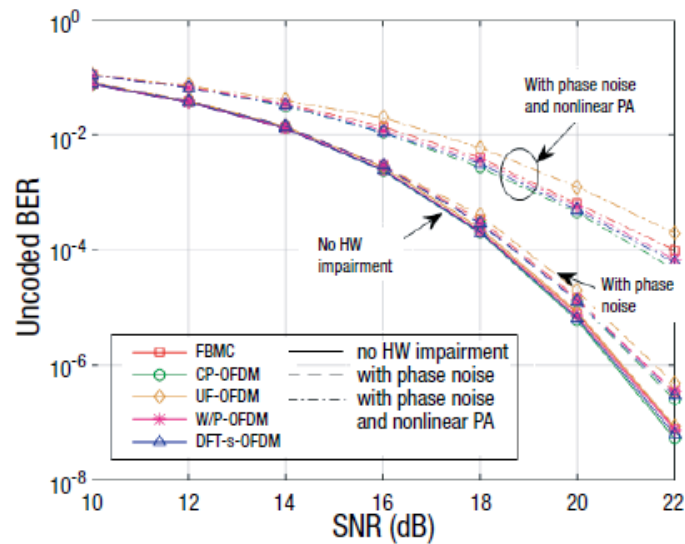


Рис.3.2. Ефективність BER різних сигналів з/без апаратних порушень

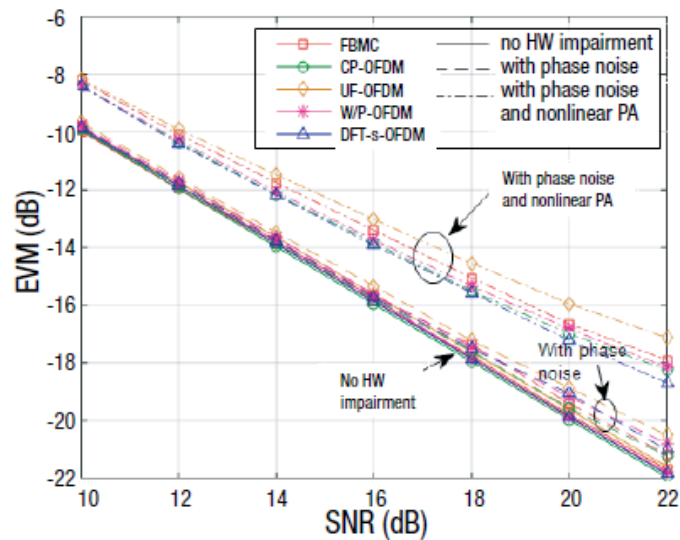


Рис. 3.3. EVM-ефективність різних сигналів з апаратними порушеннями та без них

На рисунку 3.4 показано додаткову функцію кумулятивного розподілу (CCDF) PAPR різних сигналів. На графіку чітко видно, що ефективність PAPR для сигналів FBMC-OQAM та W / P-OFDM схожа на ефективність CP-OFDM. З іншого боку, форма сигналу UF-OFDM має трохи вищий PAPR, ніж форма сигналу CP-OFDM. Порівнюючи його з сигналом SC (наприклад, DFT-s-OFDM), стає очевидним, що загальним недоліком сигналів MC є їх високий PAPR.

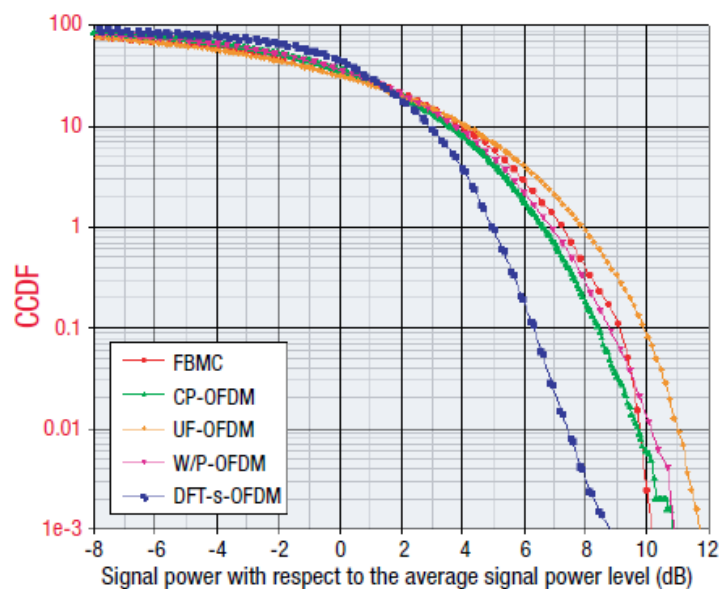


Рис. 3.4. CCDFPAPR різних сигналів

На рис.3.5 показано спектральну щільність потужності (PSD) різних форм хвиль без будь-яких апаратних порушень. Форми сигналів CP-OFDM і DFT-s-OFDM мають набагато вищі викиди потужності OOB, ніж інші форми сигналів. Зокрема, FBMC має найнижчий викид OOB серед усіх кандидатів сигналів MC. Варто згадати, що випромінювання OOB кожного сигналу залежить від налаштування параметра (наприклад, коефіцієнта перекриття для FBMC, конструкції фільтра для UF-OFDM та функції вікна / імпульсу для W/P-OFDM). Корируючи ці параметри, можна збалансувати локалізацію сигналу в часовій та частотній областях.

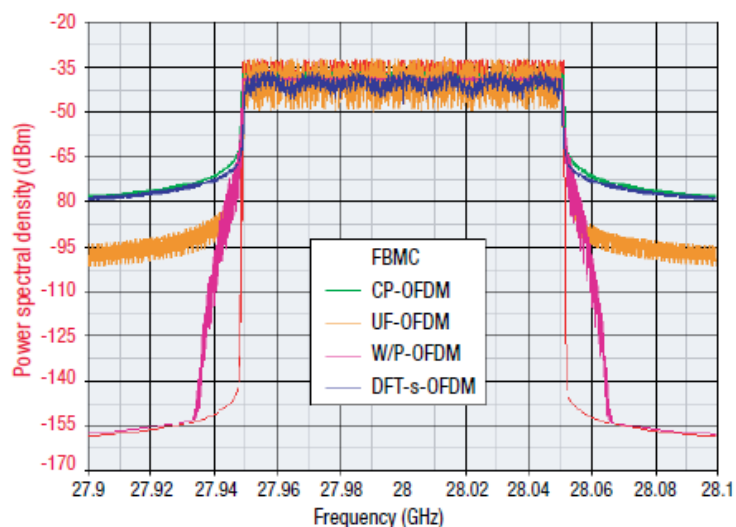


Рис. 3.5. PSD різних сигналів без апаратних збоїв

На рис.3.6 показано PSD різних форм хвиль, що зазнають фазового шуму. Порівняно з результатами на рис. 3.6, різке згортання спектра, яке забезпечують сигнали FBMC-OQAM, W/P-OFDM та UF-OFDM, значно зменшується із включенням фазових шумів. Він все ще набагато нижчий, ніж у сигналів CP-OFDM та DFT-s-OFDM. Різкого згортання спектра, обіцяного цими формами сигналів, важко досягти, якщо взяти до уваги нелінійну РА (рис. 3.8). Це пов'язано із спектральним відростанням від нелінійності ПА. Для передачі з низьким енергоспоживанням (відносно більша відключена потужність) все ще може бути перевага OOB перед CP-OFDM.

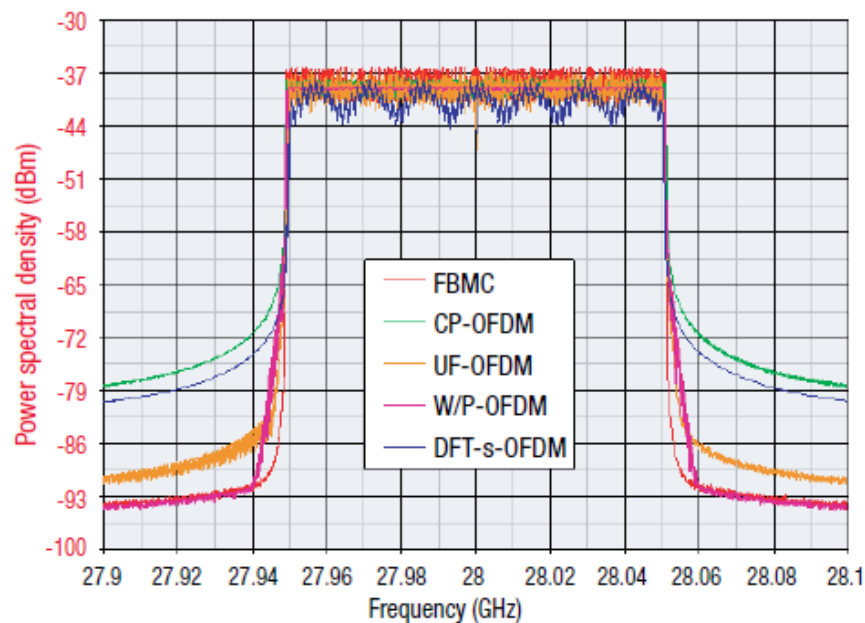


Рис.3.6. PSD різних сигналів з фазовим шумом

Ці порівняння показують, що досліджувані сигнали мають подібні характеристики EVM / BER із апаратними порушеннями та без них. Нові форми хвиль (наприклад, W/P-OFDM, FBMC, UF-OFDM) демонструють покращене спектральне обмеження порівняно з CP-OFDM та DFT-s-OFDM. Однак поліпшення стає меншим із використанням апаратних порушень (наприклад, фазового шуму та нелінійного РА). Для нелінійної РА з потужною передачею спостерігаються подібні викиди OOB для всіх форм хвиль.

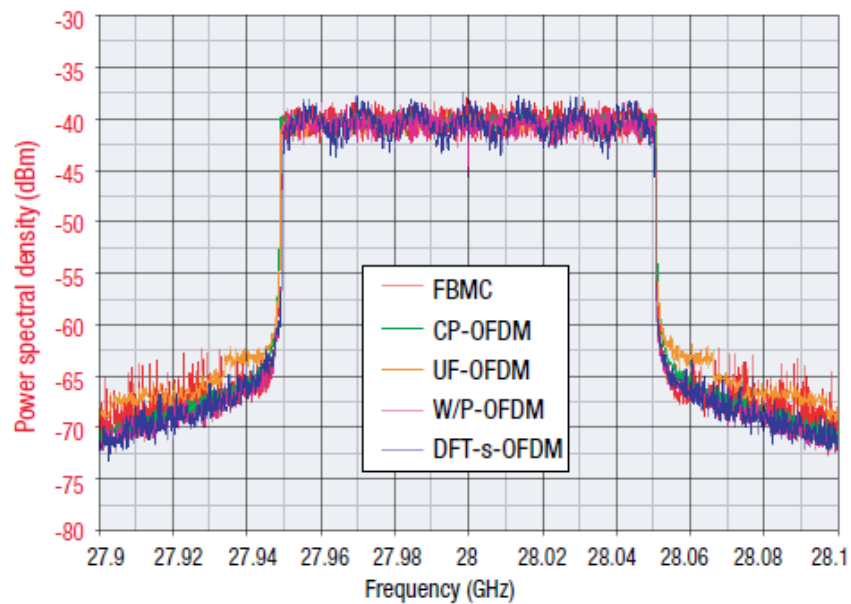


Рис.3.8. PSD різних форм хвиль, що піддаються нелінійному ПА і потужній передачі

3.2 Вибір правильної форми хвилі для mmWave

Важливим є вибір, яку форму хвилі використовувати для зв'язку mmWave. Потрібно врахувати вплив апаратних порушень, таких як фазовий шум та нелінійні ПА. Оцінка продуктивності декількох сигналів-кандидатів 5G за наявності апаратних порушень демонструє, що всі форми сигналів мають подібні характеристики EVM / BER. Оцінка також виявляє, що з компенсацією фазового шуму та досить великим інтервалом піднесучих, форми сигналів MC є більш надійними до фазових шумів.

Крім того, використання фільтруючих / віконних компонентів, розширених до сигналів OFDM, може поліпшити спектральну обмеженість (тобто, круте згортання спектра при викидах OOB). Однак апаратні порушення зменшують ці вдосконалення. У всіх випадках PathWave System Design (SystemVue) забезпечує ідеальний інструмент для точної оцінки продуктивності сигналу.

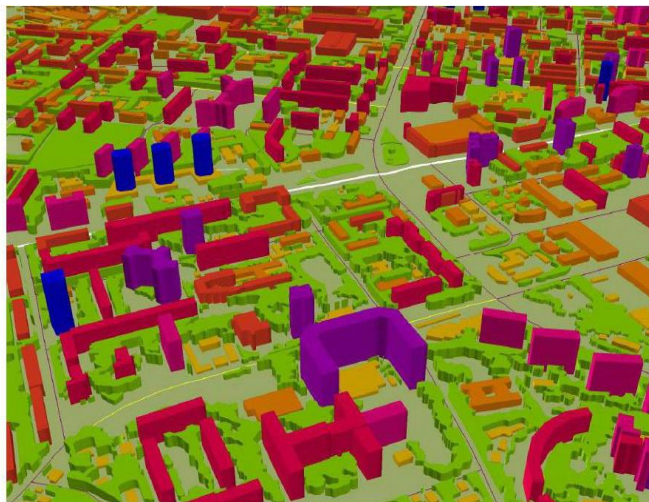
3.3 Аналіз характеристик заданого району міста

У даному підрозділі виконано аналіз географічних і кліматичних умов обраного регіону, а саме району міста Київ.

Географічне місце зони обслуговування

По варіанту завдання заданий фрагмент карти – це район міста Київ. Київ – столиця України, одне з найбільших міст Європи. Станом на 1 січня 2019 року у Києві проживало 2 928 177 осіб. Місто розташоване на півночі України по обидва береги Дніпра в його середній течії. Площа міста 836 км². Довжина вздовж берега — понад 20 км. Більша частина міста лежить на високому (до 196 метрів над рівнем моря) правому березі Дніпра — Київському плато. Менша частина лежить на низинному лівому березі Дніпра. Житлові квартали міста оточує суцільне кільце лісових масивів.

Розглянемо 3D фрагмент Київ тестовий варіант електронної версії карти фірми VISICOM™ (рис.3.9).



Area: 4 sq. km.

Рис.3.9. Фрагмент 3D мапи міста Київ

Місто: Київ (50°27'00" пн. ш. 30°31'25" сх. д.)

Густина населення по місту: 3368 чол./кв.км.

Площа заданого району міста: 4 км.кв.

Орієнтовна кількість жителів в даному районі: 13,5 тис. чол.

Характеристика забудови: щільна забудова, Переважають багатоповерхові будинки. В наявності присутні кілька точок з висотами більше 80м.



Рис.3.10.Загальна забудова

3.4 Планування мережLTE/5G в середовищі Atoll

Загальний вигляд забудови заданого фрагменту Києва зображено на рис.3.12 з відображенням різними кольорами висот будівель.

На рис. 3.11 представлено результат покриття території 5MHz-urban.

	-70	Best Signal Level (dBm) >=-70
	-75	Best Signal Level (dBm) >=-75
	-80	Best Signal Level (dBm) >=-80
	-85	Best Signal Level (dBm) >=-85
	-90	Best Signal Level (dBm) >=-90
	-95	Best Signal Level (dBm) >=-95
	-100	Best Signal Level (dBm) >=-100
	-105	Best Signal Level (dBm) >=-105

Рис.3.11. Результати покриття території двома БС

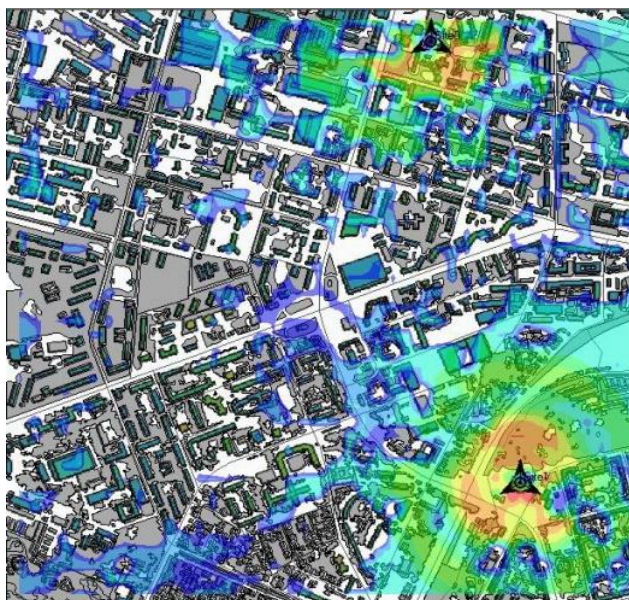


Рис. 3.12. Результат покриття заданої території з використанням Standard Propagation Model для 2-х станцій

Було розміщено дві базові станції, обираючи їх положення на найвищих будівлях району, для того щоб інші забудови не впливали на розповсюдження хвиль та були незначними перешкодами. Як видно з рис.3.4, 2-х станцій недостатньо, тому поставимо третю базову станцію.

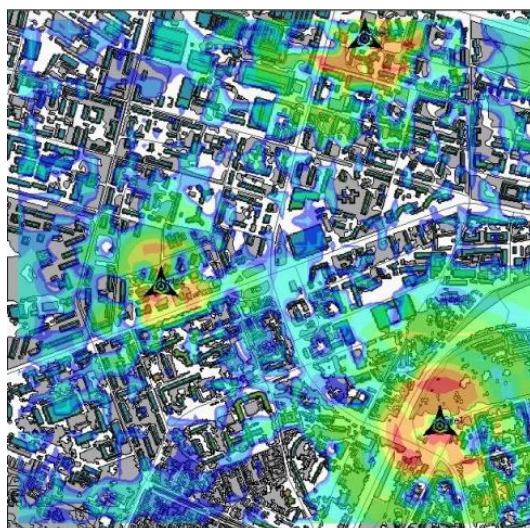


Рис. 3.13. Результат покриття заданої території з використанням Standard Propagation Model для 3-х станцій

Однак, навіть при наявності трьох БС покриття також незадовільне.

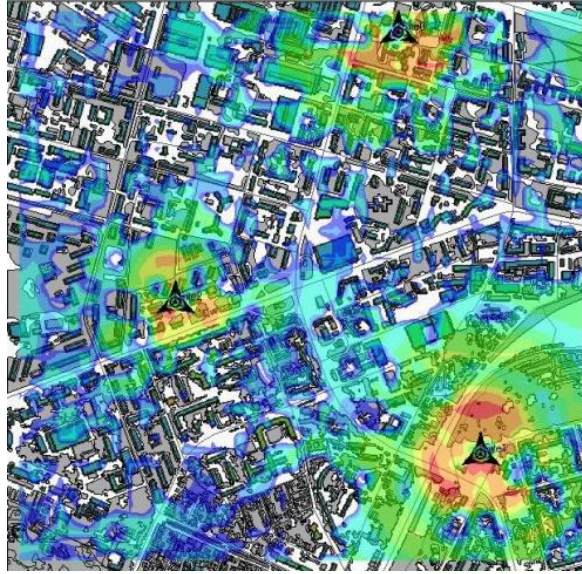


Рис.3.14. Результат покриття заданої території з використанням Standard Propagation Model при збільшенні підсилення на 2 дБ

Збільшення підсилення антен не дає відчутного ефекту. Тому для забезпечення покриття маємо додати ще одну БС. Індивідуальним підбором кутів нахилу антени досягаємо значного покращення зони покриття.

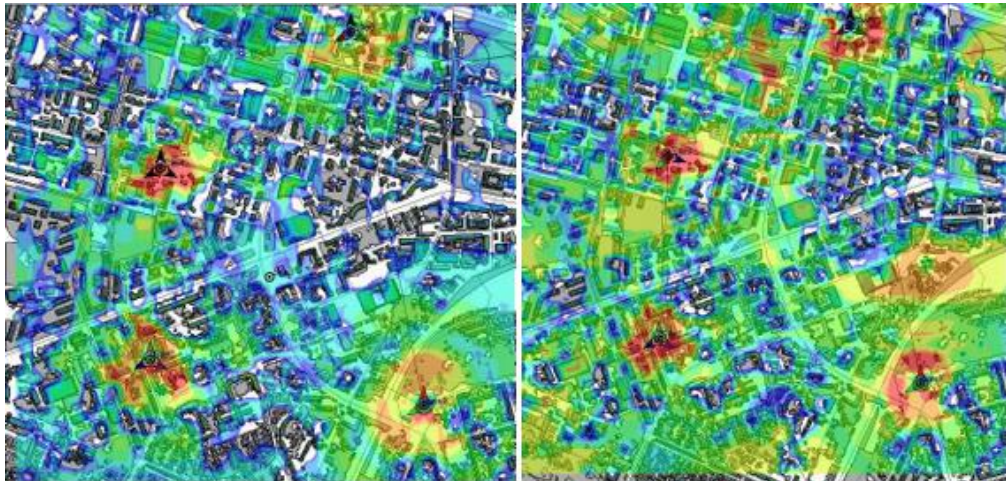


Рис. 3.15. Результат покриття заданої території з використанням Standard Propagation Model для 4-х базових станцій до і після регулювання нахилу антен

Для моделі розповсюдження Окамура-Хатта:



Рис.3.16.Результат покриття заданої території з використанням моделі розповсюдження Окамура-Хатта

Розглянемо мапу покриття розподіленого за стільниками (рис.3.17).

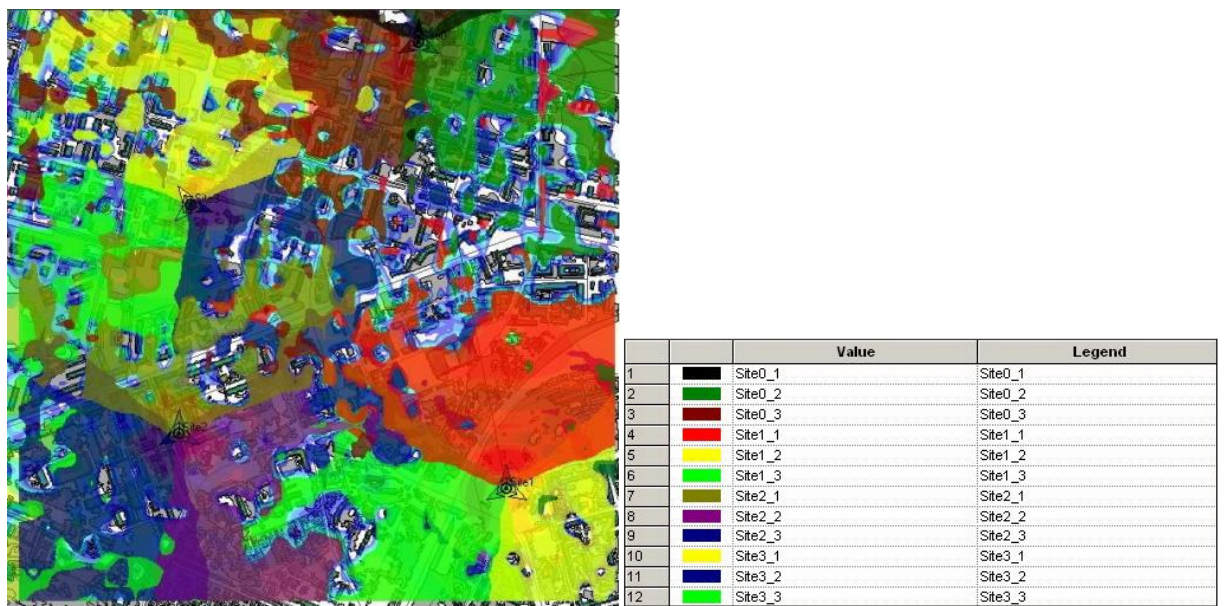


Рис.3.17.Результат розподілення покриття окремими сотами

Карта зон, де можлива операція Хендоверу, представлена на рис.3.18:

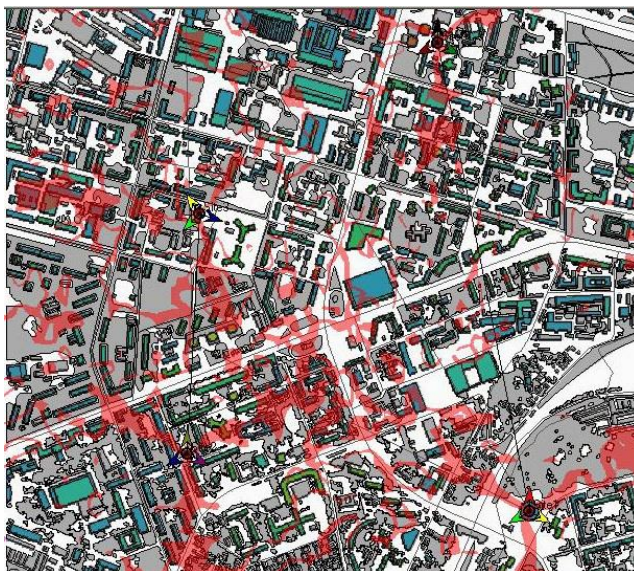


Рис. 3.18. Карта зон, де можлива операція хендоверу

Діаграма направленості антени в горизонтальній площині представлена на рис.3.19.

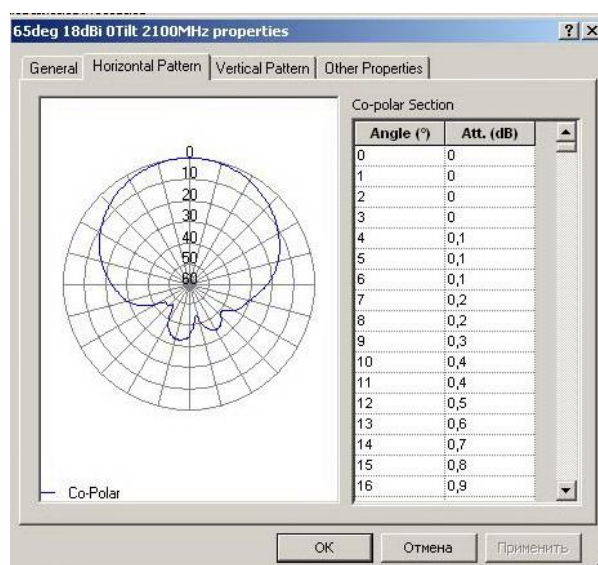


Рис.3.19. Діаграма направленості антени в горизонтальній площині

Діаграма направленості антени у вертикальній площині представлена на рис.3.20:

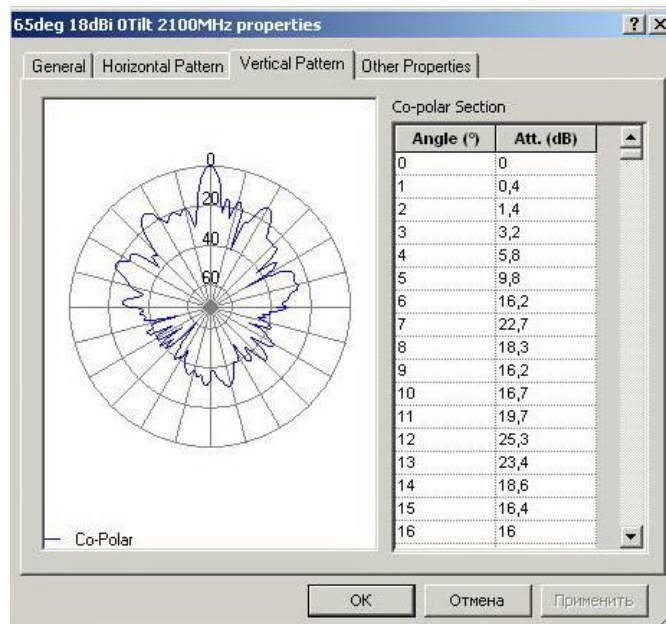


Рис. 3.20. Діаграма направленості антени у вертикальній площині

Як зазначено в умові завдання, одна з базових станцій підключена до оптики. Так як у нас 4 БС, то необхідно підключити до оптичної мережі ще одну БС. Візьмемо Site2.3 метою економічної побудови мережі, Site2 з'єднується з Site3 за допомогою радіорелейної лінії. Параметри радіорелейної лінії (рис. 3.22) та мапа зі створеним лінком показані на рис. 3.21.

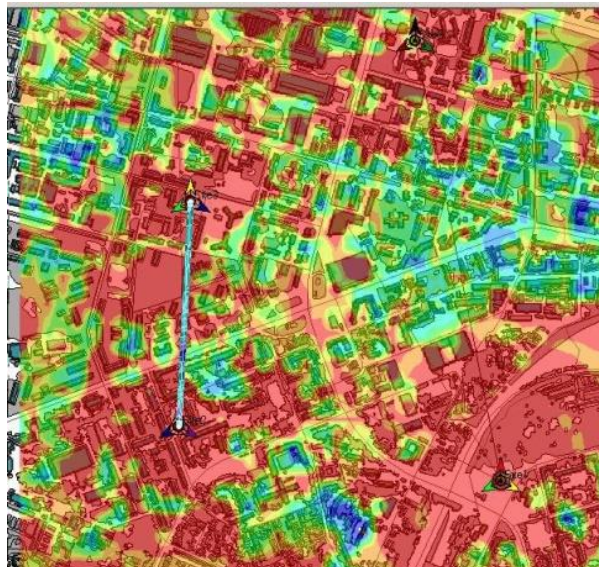


Рис. 3.21. Створення радіорелейної лінії між базовими станціями

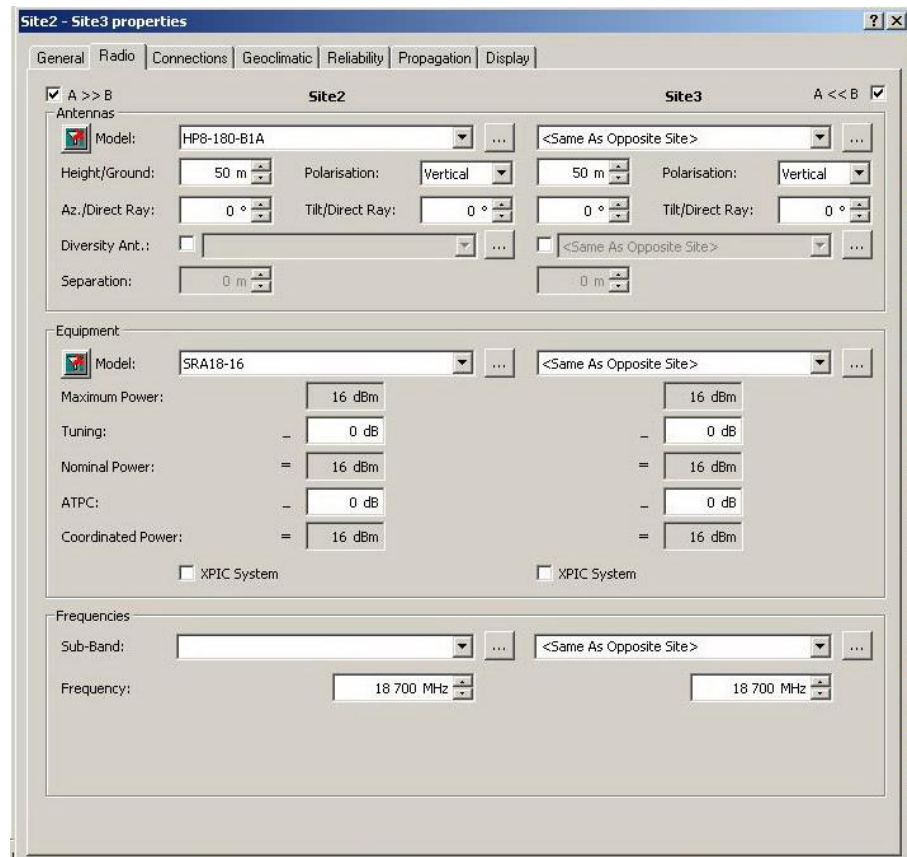


Рис. 3.22. Характеристики радіорелейної станції

3.5 Розрахунок енергетики радіоліній

Для розгортання систем використовуємо модель поширення - Standard Propagation Model. Дана модель дозволяє виконувати розрахунки в діапазоні 150-3500 МГц на відстанях від 1 до 20 км.

Формула обчислень для цієї моделі:

$$P_R = P_{Tx} - (K_1 + K_2 \log(d) + K_3 \log(H_{T_{eff}}) + K_4 \cdot \text{DiffractionLoss} + K_5 \log(d) \cdot \log(H_{T_{eff}}) + K_6 \cdot H_{R_{eff}} + K_7 \log(H_{R_{eff}}) + K_{clutter} \cdot f(\text{clutter}) + K_{hill, LOS}) \quad (3.1)$$

де P_R – прийнята потужність (dBm), P_{Tx} – випромінена потужність (EIRP) (dBm), K_1 – офсетна константа (dB), K_2 – множник для $\log(d)$, d – відстань між приймачем і передавачем (m), K_3 – множник для $\log(H_{T_{eff}})$, $H_{T_{eff}}$ – ефективна висота передавальної антени (m), K_4 – множник для обчислення

дифракції (має бути додатним, $DiffractiionLoss$ – втрати через дифракції над ускладненою трасою (dB), K_5 – множник для $\log(d) \cdot \log(H_{Txeff})$, K_6 – множник для H_{Rxeff} , H_{Rxeff} – висота мобільної антени (м), $K_{clutter}$ – множник для $f(clutter)$, $f(clutter)$ – середня величина втрат навантаження через завади, $K_{hill, LOS}$ – коректуючий чинник для горбистих регіонів (дорівнює 0 у разі NLOS).

Коефіцієнти $K_1 \dots K_7$ візьмемо з керівництва до програмного пакету (табл.3.1).

Таблиця 3.1

Коефіцієнти $K_1 \dots K_7$

	Minimum	Typical	Maximum
K_1	Variable	Variable	Variable
K_2	20	44,9	70
K_3	-20	5,83	20
K_4	0	0,5	0,8
K_5	-10	-6,55	0
K_6	-1	0	0
K_7	-10	0	0

Коефіцієнт K_1 змінюється в залежності від типу системи та частоти (див. табл. 3.5). Для LTE оберемо $K_1 = 23,8$, у програмному пакеті Atoll LTE моделюється для частоти 2110 МГц

Таблиця 3.2

Коефіцієнт K_1 для різних типів систем

Project type	Frequency (MHz)	K_1
GSM 900	935	12,5
GSM 1800	1805	22
GSM 1900	1930	23
UMTS	2110	23,8
1xRTT	1900	23
LTE	2300	24,7
	2500	25,4
	2700	26,1
	3300	27,8
	3500	28,3

Для розрахунку дифракційних втрат оберемо метод Deugout. Оскільки розрахунок дифракції при наявності великої кількості будівель на трасі є досить складним процесом, визначимо цю складову експериментально. Загасання, причиною якого є дифракція, відображається під час дослідження профілю червоною вертикальною лінією. Тоді в точці з координатами 6°498927N і 106,260014E, віддаленої від передавача на 479 метри та яка знаходиться на висоті 0м, отримали:

$$DiffractionLoss = 33(\text{dB}) \text{ для } LTE$$



Рис. 3.23. Вибір точки аналізу

Отже, значення даних для розрахунку:

Таблиця 3.3

Вихідні данні для розрахунку енергетики

K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	K_7	$K_{clutter}$	$H_{T_{eff}}$	$H_{R_{eff}}$	d
23,8/12,5	44,9	5,83	0,5	-6,55	0	0	0	30/20 м	1,5 м	479 м

Тоді для LTE потужність прийнятого сигналу:

$$P_R = 40 - (23,8 + 44,9 \log(479) + 5,83 \log(30) + 0,5 \cdot 33 - 6,55 \log(479) \cdot \log(30)) = -103.33 \text{ (dBm)} \quad (3.2)$$

Експериментальне значення, отримане за допомогою програмного пакету Atoll, в цій самій точці дорівнює $P_{\text{Рекс}} = -103,46 \text{ (dBm)}$, що є досить близьким до теоретичного значення.

3.6 Розрахунок ємності системи LTE

Абонентська ємність C_u визначається як загальне число активних користувачів в соті, яке ще може підтримуватись системою при дотриманні заданої величини відношення сигнал-завада SIR у всіх користувачів. Для виконання цієї вимоги в ортогональній системі, коефіцієнт повторного використання частот N повинен задовольняти вираз.

$$N \geq \frac{1}{a_2} \cdot \left(\frac{SIR}{a_1} \right)^{\frac{2}{\gamma}}, \quad (3.3)$$

де $a_1 = \frac{1}{M}$, M – кількість найближчих сот, які впливають на задану (по варіанту $M=8$ для ромбовидних сот); a_2 – визначається з відношення відстані повторного використання частот та радіусу соти, і рівний: для ромбовидних сот $a_2 = 4$; $\gamma=2$ – показник ступеня згасання сигналу.

$SIR = 2 + n \text{ (дБ)}$, де n – номер варіанту ($n=10$)

$SIR = 2 + 10 = 12 \text{ (дБ)}$

Тоді

$$N \geq \frac{1}{4} \cdot \left(\frac{12}{1/8} \right)^{\frac{2}{2}} = 24 \quad (3.4)$$

Тоді C_u можна виразити як відношення загальної полоси частот системи до полоси частот, необхідної для одного користувача, розділене на коефіцієнт повторного використання частот.

$$C_u = \frac{B}{N \cdot B_s}, \quad (3.5)$$

де $B=50\text{МГц}$ – загальна полоса частот системи (2570-2620 МГц), $B_s=5\text{МГц}$ – полоса частот для одного користувача. При цьому N вибирається як найменше ціле число, яке задовольняє вираз (1), тобто $N=3$.

$$C_u = \frac{50}{24 \cdot 5} = 3,33 = 0.41 \quad (3.6)$$

Оскільки приведений вище розрахунок для мереж FDM не відображає можливостей системи OFDM, то проведемо наступну оцінку ємності мережі. Оцінимо ємність мережі LTE FDD у мегаполісі за наявності пари смуг 10 +10 МГц і при використанні 4 стільникових станцій. Сумарна пропускна здатність такої мережі в напрямку до абонента складе $R_{NW} = 50,7 \times 4 = 202.8 \text{ Мбіт/с.} = 0.2028\text{Гбіт/с.}$ При розрахунку числа абонентів будемо орієнтуватися на тарифи мережі LTE Telia Sonera (Швеція): максимальний обсяг трафіку абонента на місяць - 30 Гбайт.

Таблиця 3.4

Оцінка ємності мережі LTE в мегаполісі

Трафік абонента , Мбайт/місяць	T_m	30
Число ГНН, у день	N_{BH}	17
Кількість днів у місяці	N_{Days}	30
Середній трафік абонента в ГНН, Мбіт/с	$R_{BH} = \frac{T_m \cdot 8}{N_{BH} \cdot N_{Days}}$	0,131
Частка трафіка у DL	S_{DL}	80%
Середній трафік абонента на DL в ГНН, Мбіт/с	$R_{DL} = R_{BH} \cdot S_{DL}$	0,105

ЧНН (ГНН)- година найбільшого навантаження

$$N_{sub} = \frac{R_{NW}}{R_{DL}} = \frac{0.2028}{0.105} = 1,913 \text{ тис. абон.} \quad (3.7)$$

Тобто маємо можливість для обслуговування 1913 абонентів на змодельовану нами мережу, або ж 482 абоненти на стільник.

3.7 Вибір обладнання для розгортання мережі 5G

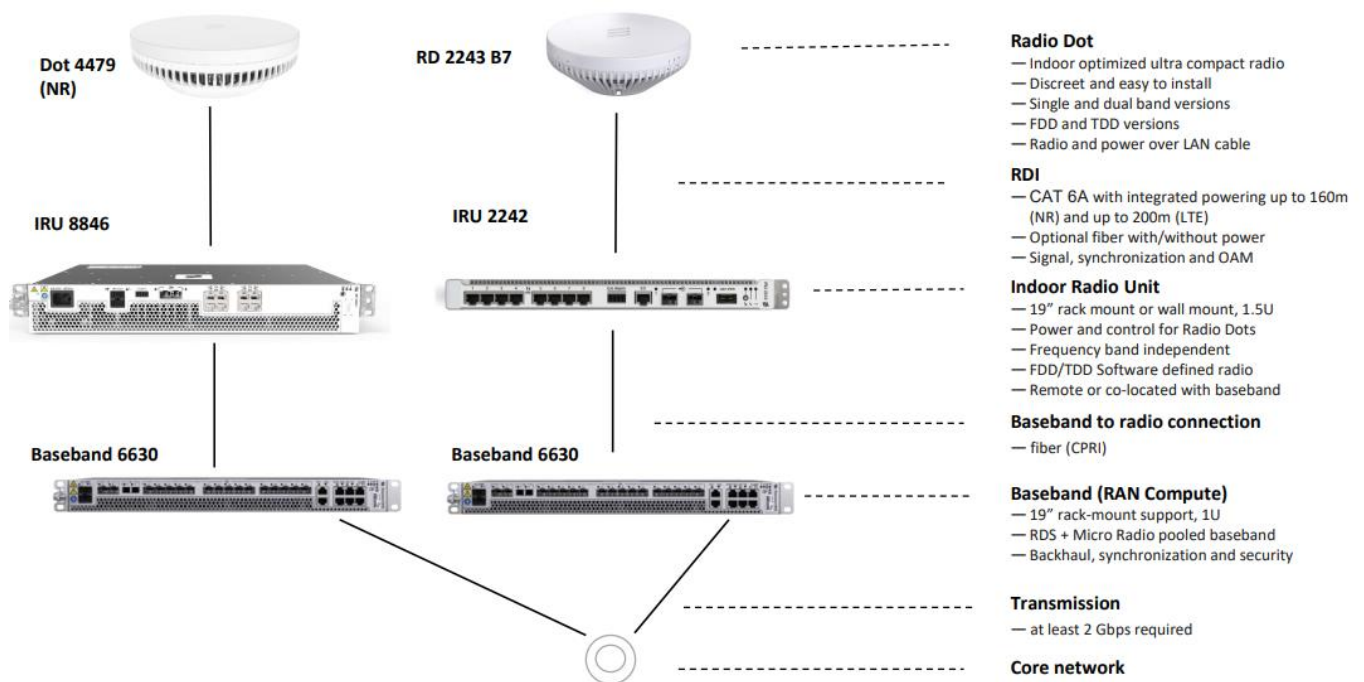


Рис. 3.24. Архітектура системи радіоточок для демонстрації 5G

Радіоточка

- Оптимізований у приміщенні надкомпактний радіоприймач
- Стриманий і простий в установці
- Одно- та двосмугові версії
- Версії FDD та TDD
- Радіо та живлення через LAN-кабель

RDI

- CAT 6A з інтегрованою потужністю до 160 м (NR) та до 200 м (LTE)
- Додаткове волокно з / без живлення
- Сигнал, синхронізація та OAM

Внутрішній радіопристрій

- 19-дюймове кріплення в стійку або настінне кріплення, 1,5U
- Живлення та управління для радіоточок
- Незалежний діапазон частот

- FDD / TDD програмне забезпечення радіо
- Віддалений або розміщений спільно з базовою смугою

Основна смуга до радіозв'язку

- волокно (CPRI)

Основна смуга (RANCompute)

- 19-дюймова опора для монтажу в стійку, 1U
- Основна смуга RDS + MicroRadio
- Зворотний зв'язок, синхронізація та безпека

Спосіб передавання

- потрібно принаймні 2 Гбіт / с

Ядро мережі



Single Band LTE	Single Band NR
	
RD 2243	Dot 4479
<ul style="list-style-type: none"> -400 Мбіт/с -2T2R -40 МГц IBW -2243: 2x 50 мВт (FDD) -Підтримка 3G, 4G -Діапазони: B1, B3, B7 -Розмір: 14 см зовнішній діаметр, 5 см висота -Вага: 420 грам (450 грам з кронштейном) 	<ul style="list-style-type: none"> - 100 МГц IBW - 4x 250 мВт (TDD) - Підтримка 4G, 5G / NR - Діапазон: B78A (Q3 2019) - Розмір: зовнішній діаметр 20 см - Вага: 1100 грам

Рис. 3.26. Порівняння радіоточок

Baseband 6630 (5G NR або LTE)

- Розмер 44,5x483x350 мм
- Вага 6,5 кг
- 19-дюймова стійка



Рис. 3.27. Зовнішній вигляд Baseband 6630

IRU 2242 (LTE)

- Розмір 30x280x350 мм
- Вага 3,7 кг
- 19-дюймове кріплення в стійку з корпусом IRU (1U)



Рис. 3.28. Зовнішній вигляд IRU 2242

IRU 8846 (5G NR)

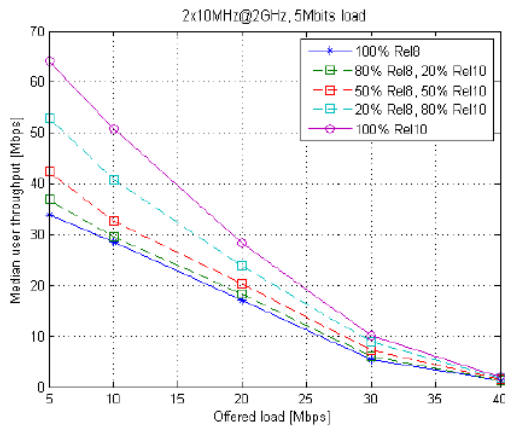
- Розмір 67x445x350 мм (1,5U)
- Вага 8,6 кг
- 19-дюймове кріплення в стійку



Рис. 3.29. Зовнішній вигляд IRU8846

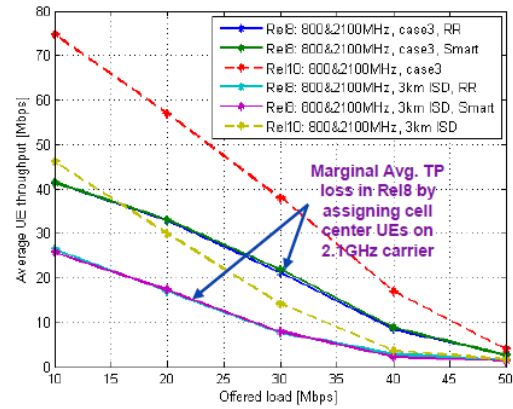
3.8 Дослідження ефективності агрегації носіїв

Продуктивність користувача з агрегацією внутрішньосмугових та міждіапазонних несучих



2x10 МГц, 2 ГГц, медіана користувача

пропускна здатність



2x10 МГц, 2,1 та 0,8 ГГц, середній користувач

пропускна здатність

Внутрішній сценарій із трафіком DL: завантаження

- W + W означає 2 оператора Wi-Fi
- W + L означає 1 Wi-Fi та 1 оператора LAA
- L + L означає 2 оператора LAA

Низьке / середнє / високе навантаження визначається в 3GPP діапазонами заповнення буфера першого оператора у випадку W + W.

Завантаження на клітинку = Завантаження на користувача * 2.5

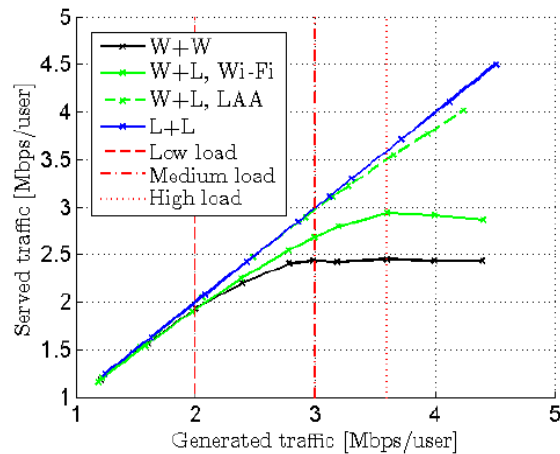


Рис. 3.30. Ефективність агрегації носіїв

Висновки

У даному розділі було запропоновано варіант побудови мережі LTE в середовищі Atoll для одного фрагменту м. Києва з розміщенням базових станцій та індивідуальним підбором кутів нахилу антен для досягнення більшого покращення зони покриття. Також було запропоноване необхідне обладнання та проведено розрахунки ємності системи LTE.

Розглянуто ключові питання для реалізації великого та ефективного моделювання мережі. Запропоновано сучасні підходи, етапи при плануванні.

РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА СТАРТАПУ

У даному розділі буде розглянуто ключові особливості розробленої системи як майбутнього стартап-проекту. Проект розглядатиметься як програмний модуль для систем тестування для створення алгоритму вибору запитань до варіантів тесту.

4.1 Опис ідеї проекту

Спочатку проаналізуємо та подамо у вигляді таблиці зміст ідеї стартап-проекту, можливі напрямки застосування та основні вигоди, які може отримати користувач товару. Ці характеристики стартап-проекту зображено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Програмний додаток для створення алгоритму для вибору запитань до варіантів тесту в системах тестування.	1. Застосування як системи для використання автоматизованого підбору запитань в тест з урахуванням відповідей студента.	Можливість створювати індивідуальні навчальні тести відповідно до рівня знань студента. Мінімальні витрати на апаратне забезпечення (сервер).
	2. Застосування для отримання ієрархічно впорядкованої структури запитань тесту.	Спрощення сприйняття інформації щодо результатів тестування.

Тепер зробимо аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї порівняно із пропозиціями конкурентів. Результати аналізу зображено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних

характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	Товари/концепції конкурентів			W (слабк а сторон а)	N (нейтраль на сторона)	S (сильн а сторон а)
		Мій проект	Конку- рент 1	Конку- рент 2			
1.	Ціна	1000\$/ рік	2000\$/ рік	2000\$/ рік			+
2.	Прибутки	3000\$/ рік	4000\$/ рік	5000\$/ рік	+		
3.	Контроль якості	Аналі- тики, корист увачі, прог- раміст и	Аналі- тики, користува чі, прог- рамісти	Аналі- тики, користува чі, прог- рамісти			+
4.	Динаміка галузі	Швидк а	Швидка	Швидка		+	
5.	Постійні витрати	1000\$/ рік	2000\$/ рік	1500\$/ рік			+
6.	Змінні витрати	1000\$ - 3000\$/ рік	1000\$ - 2000\$/ рік	2000\$ - 5000\$/ рік	+		
7.	Патенти на продукти	Немає	Патент на кожний проект	Декілька патентів на винахід	+		

№ п/п	Техніко- економічні характери- стики ідеї	Товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
		Мій проект	Конку- рент 1	Конку- рент 2			
8.	Гнучкі ціни	Ціна єдина	Ціна варіює- ється з року в рік	Ціна єдина		+	
9.	Законо- давчі обмеження	Немає	Немає	Немає			+

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Визначимо технологічну здійсненність ідеї проекту за допомогою аналізу таких складових, як технології, за якою буде виготовлено товар згідно ідеї проекту, існування таких технологій, чи їх необхідно розробити / доробити, доступність таких технологій авторам проекту. Результати даного аналізу зображено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Створення програмного продукту що реалізує алгоритму для вибору запитань до варіантів тесту в системах тестування.	Технологія роботи з базами даних Neo4j.	Так	Дані технології доступні.
	Технологія глибокого навчання Scikit-Learn.	Так	Дані технології доступні, функціоналу не вистачає для поставлених задач.

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Створення програмного продукту що реалізує алгоритму для вибору запитань до варіантів тесту в системах тестування.	Технологія для обробки даних з застосуванням машинного навчання TensorFlow.	Так	Дані технології доступні.
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: глибокого навчання (Scikit-Learn.), обробки тексту з застосуванням машинного навчання (TensorFlow).			

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Проведемо аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку. Результати даного аналізу зображено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	400 000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Висока точність класифікації, швидкодія, невибагливість до ресурсів
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	70

Таким чином, за попереднім оцінюванням, ринок є привабливим для входження. Надалі визначимо потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформуємо орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи. Ці дані зображено в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Об'єктивна система тестування знань	Навчальні заклади	Навчальним закладам буде потрібно мати панель для адміністрації наявних в системі акаунтів. При цьому заплативши мінімум грошей на сервери.	Клієнти прагнуть отримати систему для автоматизації тестування знань, яка має гнучкий алгоритм

				вибору запитань в тести. Також прагнуть точності та швидкодії від системи.
--	--	--	--	--

Після визначення потенційних груп клієнтів проведемо аналіз ринкового середовища: складемо таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту (таблиця 4.6), та факторів, що йому перешкоджають (таблиця 4.7).

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Відсутність попиту	Цільова аудиторія може не оцінити переваги продукту	Акцентувати увагу на клієнтах, що вже скористалися продуктом, якщо такі є, навести інфографіку результативності (очікувану), запропонувати знижку потенційному клієнту в рамках тендеру.
2	Неточна робота алгоритму	Неправильно задана структура даних та недостатньо точно проведене налаштування системи можуть призвести до зниження точності роботи алгоритму	Розробка і випуск та підтримка інструкції користувача з детальними поясненнями та відповідями на часто виникаючі запитання, впровадження зворотного зв'язку та системи підтримки користувача.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1	Кобрендінг	Пропозиція від певної компанії, що спеціалізується на системах	Виділення частини штату на реалізацію проекту, підготовка акційних пропозицій по переходу на

		автоматизації тестування, розробити спільний продукт	новий продукт існуючим клієнтам.
--	--	--	----------------------------------

Надалі проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку. Результати даного аналізу зображені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Чиста конкуренція	Гравці ринку не мають явних переваг один над одним	Більш вигідні умови на тендерах, агресивний маркетинг
2. Регіональна конкуренція	Гравці ринку – інтернаціональні підприємства	Вихід на ті ринки, які ще не зайняті конкурентами
3. Внутрішньогалузева конкуренція	Гравці ринку знаходяться в одній галузі – розробці ПЗ	
4. Товарно-видова конкуренція	Усі продукти гравців ринку мають одне призначення	Розробка найбільш інтуїтивного інтерфейсу, оптимізація алгоритмів згідно з потребами користувачів
5. Конкурентні переваги нецінові	Продукти відрізняються гнучкістю, функціоналом (незначно) і надійністю.	У маркетингу неявно порівнювати власний продукт з іншими, робити вигідні цінові пропозиції
6. Марочна конкуренція	Значна увага приділяється бренду, що розробив продукт	Кобрендінг

Тепер визначимо та обґрунтуємо фактори конкурентоспроможності, які зображені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Невибагливість до апаратних ресурсів (серверів). А отже дешевизна апаратних ресурсів, потрібних для нашої системи	В продукті використане поєднання класичних методів структурування даних та методів машинного навчання
2	Швидкодія	В продукті використане поєднання класичних методів структурування даних та методів Машинного навчання
3	Інтеграція	Продукт не потребує придбання спеціалізованого апаратного забезпечення
4	Модульність	Продукт представлено у вигляді веб-додатку
5	Гнучкість	Кожен замовник має можливість замовити розширення функціоналу продукту під його конкретні задачі
6	Алгоритм додавання запитань в тесті	Користувачі мають змогу використовувати алгоритм, що обирає запитання до тесту базуючись на попередніх відповідях тестованого

Таблиця 4.10 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Динаміка галузі, продуктова лінія, бар'єри проникнення	Наявність товарних знаків, доступ до ресурсів, патенти на продукти	Концентрація постачальників, диференціація витрат	Рівень чутливості до зміни цін, прибутки, контроль якості	Ціна, лояльність споживачів
Висновки:	Конкуренція не є інтенсивною, адже даний	Для входу на ринок необхідно створити товарний	Постачальники не диктують умови роботи на ринку, бо	Клієнти диктують умови роботи на ринку, бо	При наявності товарів замінників необхідно

	ринок ще ніким не зайнятий.	знак та написати бета-версію програмного продукту. На даний момент потенційних конкурентів немає.	програмному продукту не потрібно постачання.	вони є єдиним джерелом прибутку компанії.	буде зменшувати ціну програмного продукту.
--	-----------------------------	---	--	---	--

За визначеними факторами конкурентоспроможності проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту. Результати даного аналізу зображено в таблиці 4.11. Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін програми

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Інтеграція	17			*				
2	Модульність	18					*		
3	Гнучкість	16			*				
4	Алгоритм додавання запитань в тесті	17			*				

Тепер проведемо SWOT-аналіз на основі виділених загроз і можливостей, та сильних і слабких сторін проекту. SWOT-матриця зображено в таблиці 4.12.

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: алгоритм створення індивідуальних варіантів тесту, невибагливість до обчислювальних ресурсів, швидкодія	Слабкі сторони: Програмний продукт на даний момент можна використовувати лише у вигляді додаткового встановлюваного модуля для існуючих ПП
Можливості: Кобрендінг	Загрози: Неточність алгоритму, відсутність попиту

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтований оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок. Дані альтернативи зображено в таблиці 4.13.

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>№ п/п</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Реалізація можливості використання системи не тільки на веб-сайтах, а й десктопних та телефонних додатках	Середня	24 місяці
2	Розробка MVP	Висока	12 місяців

Серед даних альтернатив було обрано другу альтернативу, адже строки її реалізації найменші та найвища ймовірність отримання ресурсів.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Для розроблення ринкової стратегії першим кроком необхідно описати цільові груп потенційних споживачів, які можна побачити в таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтов- ний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсив- ність конкурен ції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1.	Вузькоспеціалізовані навчальні заклади	Середня	3-5 закладів в рік	Середня	Складна
2.	Навчальні заклади базового рівня (школи, ліцеї, гімназії)	Готові	5-10 закладів в рік	Слабка	Середня

3.	Вищі навчальні заклади	Готові	3-5 закладів в рік	Середня	Складна
Було обрано цільову групу навчальних закладів базового рівня.					

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформуванати базову стратегію розвитку, яку ображено в таблиці 4.15.

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Концентрація на потребах одного цільового сегменту – веб-сайтах.	Створений продукт є дешевим у використанні та іноватійним	Стратегія спеціалізації.

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки, яку зображено в таблиці 4.16.

Таблиця 4.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Так.	Компанія буде шукати нових споживачів, але і, за потреби, буде намагатися забирати існуючих у конкурентів.	Компанія, за потреби, буде копіювати характеристики конкурентів.	Стратегія заняття конкурентної ніші.

Тепер розробимо стратегію позиціонування, що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект. Її зображено в таблиці 4.17.

Таблиця 4.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
Алгоритм додавання запитань до тесту має бути точним. Система є невибагливою до ресурсів Система є швидкою	Проведення крупних оновлень (оптимізація розрахунків), створення додаткового функціоналу.	Товар є іноваційним (в тренді) та дешевим у використанні порівняно з альтернативами	Швидкий, невибагливий до ресурсів та зручний доступ до використання простих та складних алгоритмів розміщення запитань до тестів, програма працює в режимі онлайн.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Сформуємо маркетингову концепцію товару, який отримає споживач. В таблиці 4.18 зображено результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18 – Ключові переваги концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Алгоритм індивідуального підбору запитань в тесті для кожного тестованого.	Об'єктивне оцінювання знань з використанням індивідуального підбору запитань.	Доступність для використання в навчальних закладах.
2.	Невибагливість до апаратних ресурсів	Невибагливість до апаратних ресурсів клієнта	Доступність для використання в навчальних закладах.
3.	Швидкодія	Швидкодія системи	Більша швидкість

Надалі розробимо трирівневу маркетингову модель товару: уточнимо ідею продукту, його фізичні складові, особливості процесу його надання. Дана модель зображена в таблиці 4.19.

Таблиця 4.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Програмний продукт – система тестування, яка дозволяє користувачу використовувати алгоритм індивідуального підбору запитань до варіантів тесту.
II. Товар у реальному виконанні	Властивості / характеристики: 1. Можливість використання алгоритму для індивідуального підбору запитань до тесту 2. Можливість використання стандартних алгоритмів вибору запитань до тесту
	Якість: програмний продукт пройшов всі етапи тестування та готовий до використання.
	Марка: назва організації-розробника «Bloschchanevych Co», назва товару «MyTest».
III. Товар із підкріпленням	Спеціаліст із впровадження встановлює ПЗ.
	Відділ розробки підтримує життєдіяльність ПЗ.
Захист програмного продукту буде організовано за допомогою ноу-хау.	

Тепер визначимо цінові межі, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар, яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субституту, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів. Аналіз проводився експертним методом і його результати зображено в таблиці 4.20.

Таблиця 4.20 – Визначення меж встановлення цін

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
2000-5000 \$/рік	4000-6000 \$/рік	7000-9000 \$/рік	Нижня межа – 2000 \$/рік, верхня межа - 5000 \$/рік

Надалі визначимо оптимальну систему збуту, в межах якого приймається рішення. Дану систему зображено в таблиці 4.21.

Таблиця 4.21 – Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Клієнт виплачує гроші на рік, тоді до нього приходить спеціаліст із впровадження інформаційних систем і встановлює ПЗ на комп'ютер клієнта.	Встановити програмний продукт на комп'ютери клієнтів.	Один посередник – спеціаліст по впровадженню інформаційних систем.	Канал збуту одного рівня.

Тепер розробимо концепцію маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів. Дану концепцію зображено в таблиці 4.22.

Таблиця 4.22 – Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Клієнт намагається знайти нові алгоритми розподілу запитань в тестових завданнях.	Мережа Інтернет, соціальні мережі, месенжери.	Швидкодія, неவிбагливість до апаратних ресурсів, іновацийність ПЗ, відносно невелика вартість ПЗ.	Продемонструвати швидкодію, дешевизну експлуатації, іновацийність та відносно невелику вартість ПЗ.	Показати можливість за невелику ціну зацікавити користувачі в свого ПЗ.

Висновки до розділу

В даному розділі було повністю виконано перший етап розроблення стартап-проекту, а саме, виконано маркетинговий аналіз стартап-проекту.

За допомогою нього можна сказати, що існує можливість ринкової комерціалізації проекту, адже на ринку наявний попит на системи автоматизованого тестування знань та алгоритми для створення тестів, до того ж рентабельність роботи є досить високою.

З огляду на потенційну групу клієнтів, а саме, навчальні заклади базового рівня та іноваційність технології є великі перспективи впровадження даного програмного забезпечення.

Для ринкової реалізації проекту доцільно обрати таку альтернативу впровадження: створення MVP та впровадження його в невелику кількість навчальних закладів базового рівня.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

Метою цієї роботи є дослідження методів планування та оптимізації мереж 5G на прикладі проектування мережі у м.Київ. На даний момент мережа 5G не розвинена в Україні, тоді як потреби населення в високошвидкісному бездротовому доступі в Інтернет постійно зростають. 5G здатна найбільш повно задовольнити потреби очікування абонентів мобільного зв'язку в нових сервісах.

Для досягнення поставленої мети, в роботі були вирішені наступні завдання:

1. Розглянуто особливості архітектури та основні сервіси мережі 5G, такі як MEC, Network Slicing, Dual Connectivity, Beam Management та віртуалізація мережних функцій.

2. Розглянуто перспективи модернізації мереж зв'язку від LTE до 5G та доступні мережеві рішення при міграції з існуючих мереж. Визначено найкращий сценарій міграції з LTE до 5G. Ним виявився перехід від LTE до NSA зі збереженням існуючої архітектури мережі, як найбільш досудний операторам зв'язку і в одночас такий, що дозволяє значно розширити спектр послуг що надаються.

3. Зроблено оцінку радіопокриття проекрованої мережі LTE/5G для м.Київ, оцінено продуктивність і ємність проекрованої мережі в м.Київ. Зроблено вибір обладнання.

4. Проведено огляд технології підвищення пропускнуєї спроможності і завадостійкості мереж зв'язку на основі MIMO.

5. Запропоновані сучасні підходи, етапи при плануванні та проведено моделювання мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ECC/DEC/(06)01. ECC Decision of 24 March 2006 on the harmonized utilization of spectrum for terrestrial IMT-2000/UMTS system operating within the bands 1900-1980 MHz 2010-2025 MHz and 2110-2170 MHz (ECC/DEC/(06)01). - Electronic Communications
2. Enhanced Interference Control for Cell-Edge Performance. Qualcomm. January 2008.
3. Скрынников В.Г. Нетрадиционное частотное планирование в сетях UMTS/HSPA+//Радиочастотный спектр. - 2012. - № 6.
4. Ch. Chevallier, Ch. Brunner, A. Garavaglia, K. P. Murray, K.R. Baker. WCDMA (UMTS) Deployment Handbook.Planning and Optimization Aspects. - John Wiley & Sons Ltd 2006.
5. WCDMA Radio Network Tuning.- Student Book.Ericsson.2007
6. ERC/REC 01-01 Border Coordination of UMTS. - ERC Recommendation 01-01. 2007.
7. ERC/REC/(08)02. Frequency Planning and Frequency Coordination for the GSM 900 (including E-GSM)/UMTS 900, GSM 1800/UMTS 1800 Land Mobile Systems. – ERC Recommendation (08)02. 2008.
8. Скрынников В.Г. Предварительная оценка параметров сети UMTS/HSDPA при статическом распределении мощности базовой станции// Мобильные Телекоммуникации. - 2009. - № 2.
9. UMTS Radio Network Planning Fundamentals (FDD mode, R2/R3). - Alcatel.
10. А. В. Печаткин «Системы мобильной связи. Часть 1. Принципы организации, функционирования и частотного планирования систем мобильной связи: Учебное пособие; РГАТА. – Рыбинск, 2008. – 122 с.»
11. User Manual. Конспект лекцій по дисципліні «Технології безпроводових ТКС», КПИ, 2012/2013 н.р..
12. Ильченко М.Ю., Кравчук С.О. Сучасні телекомунікаційні системи. – К.: НВП "Видавництво "Наукова думка" НАНУ України", 2008. – 328 с.

13.Ильченко М.Ю., Кравчук С.О. Телекомунікаційні системиширококутового радіодоступу. – К.: Наукова думка, 2009. –312 с.

14. Керівництво по роботі з програмним пакетом Atollвелектронному вигляді.

15.Ильченко М.Е., Кравчук С.А. Телекоммуникационные системы на основевысотныхаэроплатформ. – К.: НПП"Издательство "Наукова думка" НАН Украины", 2008. – 580

16. Феер К. Беспроводнаяцифроваясвязь. Методымодуляцииирасширения спектра: Пер. с англ. – М.: Радио и связь,2000. – 520 с.

17. Складар Б. Цифроваясвязь. Теоретическиеосновыипрактическоеприменение.: Пер. с англ. – М.: Издательскийдом «Вильямс», 2003. – 1104 с.

18. ПрокисДж. Цифроваясвязь.: Пер. с англ.–М.: радиои связь, 2000.– 800 с.

19. Поповський В.В, Лемешко О.В.; Ковальчук В.К.; “Телекомунікаційні системи та мережі. Структура й основні функції. Том 1” <http://www.znanius.com/3533.html>

20. Технология LTE [Электронный ресурс] // Анисимов Алексей Валерьевич. URL: <http://anisimoff.org/lte/lte.html>

21. Гольдштейн, Б.С., Кучерявый, А.Е. Сети связи пост-NGN / Б.С. Гольдштейн, А.Е. Кучерявый. – СПб: БХВ-Петербург, 2014.- 160 с.: ил.

Беделл, П. Сети. Беспроводные технологии / П. Беделл; пер. с англ. Р.М.Евтеев. – М.: НТ Пресс, 2008.- 441 с.: ил.

22.2G [Электронный ресурс] // Википедия: Свободная энциклопедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/2G> .

23. Тихвинский, В.О., Терентьев, С.В., Юрчук, А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура / В.О. Тихвинский, С.В. Терентьев, А.Б. Юрчук. – М: Эко-Трендз, 2010.- 284 с.: ил. 7. Тихвинский В.О. Эволюция мобильных сетей 2G/3G/4G[Электронныйресурс]//МСЭ.URL: http://www.itu.int/en/ITUUD/Regional./09/Session_1_Tikhvinskiy_1.pdf

24.Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G / В.М. Вишневский, С.Л. Портной, И.В. Шахнович. – М: Техносфера, 2009.- 472 с.

25.Тихвинский, В.О., Бочечка, Г.С. Концептуальные аспекты создания 5G / В.О. Тихвинский, Г.С. Бочечка // Электросвязь.- 2013. - №10. – С.29-33.

26. Карасёв С. Установлен рекорд скорости передачи данных в 5G-сети: 7,5 Гбит/с [Электронный ресурс] // 3D News: DailyDigitalDigest. URL: <http://www.3dnews.ru/tags/5g#903594>

27. Гельгор, А.Л., Попов, Е.А. Технология LTE мобильной передачи данных: Учебное пособие / А.Л. Гельгор, Е.А. Попов. – СПб.: Издательство Политехнического университета, 2011. — 204 с.